

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA EM
FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Tamires Suani Calgaro

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUO HOSPITALAR EM MISTURA COM SOLO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Frederico Westphalen, RS
2023

Tamires Suani Calgaro

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUO HOSPITALAR EM MISTURA COM SOLO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus Frederico Westphalen - RS, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Orientador: Dr Alexandre Couto Rodrigues
Coorientador: Dr. Willian Fernando de Borba

Frederico Westphalen, RS
2023

Calgato, Tamires Suani
Utilização de cinza de resíduo hospitalar em mistura com solo em pavimentos flexíveis/
Tamires Suani Calgato. -2023.
92p.; 30cm

Orientador: Alexandre Couto Rodrigues
Coorientador: Willian Fernando de Borba
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico
Westphalen, Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, RS, 2023.

1. Resíduos Hospitalares 2. Índice de Suporte Califórnia 3. Pavimentação. I. Rodrigues,
Alexandre Couto II. De Borba, Willian Fernando III. Utilização de cinza de resíduo hospitalar
em mistura com solo em pavimentos flexíveis.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da
Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB
10/1728.

Tamires Suani Calgaro

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUO HOSPITALAR EM MISTURA COM SOLO
EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus Frederico Westphalen - RS, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Aprovada em 31 de janeiro de 2023:

Dr. Alexandre Couto Rodrigues (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva (UFSM)

Dr. Jaelson Budny (UNIPAMPA)

Frederico Westphalen, RS
2023

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Denilso e Sederlei que sempre acreditaram em mim e nos meus sonhos, ao meu esposo Jardel, por esta sempre ao meu lado me apoiando e incentivando, amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Denilso e Sederlei Calgaro, que sempre me apoiaram e incentivaram na busca por realizar meus sonhos. Que nunca mediram esforços, sempre contribuindo para que os meus objetivos fossem alcançados. Este título é um dos meus grandes sonhos, muito obrigada por todo o amor, incentivo e apoio durante a jornada até aqui.

Ao meu esposo Jardel Konzen que esteve ao meu lado, me auxiliando na coleta de solos e na realização dos ensaios, me fornecendo todo o suporte, incentivo e contribuição necessária para finalização da pesquisa. Obrigada por estar ao meu lado e me incentivar na busca por realizar meus sonhos.

Aos amigos, que o mestrado me proporcionou, em especial a Anna Carolina, Gilvan e Luis Fernando, que contribuíram diretamente na realização dos ensaios, me auxiliando durante meses no período da noite no laboratório de solos. Colocando em prática o presente projeto, obrigada por toda contribuição e amizade que se formou.

Ao meu orientador Professor Dr. Alexandre Couto Rodrigues, que abraçou a ideia da dissertação e projeto de mestrado, desde o primeiro momento, que sempre se disponibilizou a transmitir conhecimentos para realização de todo o mestrado, nas disciplinas de docência e no projeto de pesquisa, tanto conhecimentos didáticos como práticos. Sou muito grata por toda ajuda, suporte e oportunidades proporcionadas nesses dois anos, muito obrigada!

Ao meu coorientador, Professor Dr. Willian de Borba, pelo suporte, ensinamentos e contribuição para o desenvolvimento da presente dissertação e ensaios realizados. Contribuindo também na coleta de solos para os ensaios e buscas bibliográficas.

Agradeço ao Professor Vanderlei Rodrigues, todo o conhecimento transmitido na área de solos e análises, que foram de suma importância para a realização dos ensaios, assim como o empréstimo de materiais e laboratório de Análise de Solos para a realização da pesquisa. E o professor Dr. Genésio da Rosa pelo empréstimo de local para armazenamento dos solos e cinzas utilizados na pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Maria, pelo suporte e fornecimento de todos os materiais necessários para realização desta dissertação. Agradeço em especial ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da UFSM Campus Frederico Westphalen, juntamente com seus professores, secretários e técnicos administrativos, que colaboraram para minha formação acadêmica.

A empresa Ambientuus, que se prontificou, desde o primeiro contato, a fornecer todo o material necessário para realização da presente pesquisa, realizando transporte de material e passando informações de análises das cinzas e composição. Agradeço muito a disponibilidade de atendimento de todos da empresa, que contribuíram para que este projeto fosse realizado.

Ao setor do Almojarifado da UFSM-FW, em especial aos motoristas e funcionários que auxiliaram durante a coleta, transporte, carregamento e descarregamento de materiais utilizados durante a pesquisa.

Aos laboratoristas da UFSM-FW e Santa Maria, em especial ao Lucindo Somavilla e Alisson, que contribuíram diretamente na prática dos ensaios. Transmitindo ensinamentos práticos e teóricos, estes de suma importância para análises dos ensaios e resultados obtidos.

Sou extremamente grata pela ajuda todos vocês, durante toda a realização do mestrado, desde o seu início das disciplinas, docência, como nas coletas de materiais, realização dos ensaios, até na etapa final de análises de resultados e escrita da dissertação.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” - Arthur Schopenhauer

RESUMO

UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUO HOSPITALAR EM MISTURA COM SOLO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.

AUTORA: Tamires Suani Calgaro
ORIENTADOR: Alexandre Couto Rodrigues
CO-ORIENTADOR: Willian Fernando de Borba

Na engenharia de pavimentos um dos materiais mais utilizados na composição de suas camadas é o solo, entretanto em muitos casos, o solo disponível não possui propriedades adequadas. Com o propósito de utilizar o solo como base para o pavimento, pode-se realizar melhorias em suas propriedades através do processo de estabilização. Com base nisso, esse trabalho teve como objetivo avaliar as implicações decorrentes da substituição parcial de um solo natural, por cinzas oriundas de resíduos hospitalares, visando posteriormente a sua aplicação nas camadas de pavimentos flexíveis. Na presente pesquisa, o solo em análise foi estabilizado química e granulometricamente, através da substituição do solo natural por teores de 10, 15, e 20, % de cinza de resíduos hospitalares. O solo utilizado no estudo é constituído predominantemente de argila, material de granulometria fina (inferior a 02 mm). Do ponto de vista químico, os tratamentos não apresentaram potencial contaminante para o meio ambiente, podendo ser utilizado em camadas de pavimentos. No que se refere aos valores de Índice de Suporte Califórnia, constatou-se melhorias significativas na resistência do solo após o processo de estabilização, quando comparado ao solo natural. Nesse ensaio foi verificado que as misturas de solo com adição de 10 e 15 % possuem as maiores expansões, e o solo natural e solo natural+20% de cinza possuem as menores expansões. Entretanto, todos os tratamentos possuem expansão menor que o mínimo exigido em norma para utilização em camadas de pavimentos. Os valores de Índice de Suporte Califórnia, aumentaram significativamente o tratamento Solo Natural+20%, sendo este considerado como tratamento mais eficiente, podendo ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos e com expansão inferior a 1%. Deste modo, confirmou-se que o solo natural presente na região de Frederico Westphalen/RS pode ser aplicado diretamente na camada de sub-base de pavimentos flexíveis, desde que estabilizado química e granulometricamente com teores de substituição de 20% de cinza de resíduos hospitalares.

Palavras-chave: Estabilização de solos. Índice de Suporte Califórnia. Resíduos Perigosos.

ABSTRACT

USE OF HOSPITAL WASTE ASH IN MIXTURE WITH SOIL IN FLEXIBLE PAVING.

AUTHOR: Tamires Suani Calgaro
ADVISOR: Alexandre Couto Rodrigues
CO ADVISOR: Willian Fernando de Borba

In paving engineering, one of the most used materials in the composition of its layers is the soil, however, in many cases, the available soil does not have appropriate properties. With the purpose of using the soil as a base for the sidewalk, it is possible to improve its properties through the stabilization process. Based on this, this study aimed to evaluate the implications of the partial replacement of a natural soil by ashes from hospital waste, aiming at its subsequent application in the layers of flexible sidewalks. In the present research, the soil under analysis was stabilized chemically and granulometrically, through the substitution of the natural soil by levels of 10, 15, and 20, % of ash from hospital waste. The soil used in the study is composed predominantly of clay, material of fine granulometry (less than 02 mm). From the chemical point of view, the treatments did not present a contaminant potential for the environment, and can be used in sidewalk layers. With regard to the California Support Index values, significant improvements in soil strength were found after the stabilization process, when compared to natural soil. In this test it was found that the soil mixtures with 10 and 15% addition have the highest expansions, and the natural soil and natural soil + 20% ash have the lowest expansions. However, all treatments have expansion less than the minimum required in the standard for use in sidewalk layers. The values of California Support Index, significantly increased the treatment Natural Soil + 20%, being considered as the most efficient treatment, which can be used in layers of sidewalk sub-base and with expansion less than 1%. Thus, it was confirmed that the natural soil present in the region of Frederico Westphalen/RS can be applied directly in the sub-base layer of flexible sidewalks, provided that stabilized chemically and granulometrically with replacement levels of 20% hospital waste ash.

Keywords: California Bearing Ratio, Soil Stabilization, Hazardous Waste.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Estrutura de um pavimento flexível..... | 41 |
| Figura 2- Estrutura de um pavimento rígido | 42 |
| Figura 3- Pavimento semirrígido com sub-base de solo-cimento | 43 |

ARTIGO

| | |
|--|----|
| Figura 1- Mapa de localização do município de Seberi | 49 |
| Figura 2- Ponto de extração e coleta de solo. | 50 |
| Figura 3- Cinza de resíduos hospitalares passantes na peneira #4,2mm | 51 |
| Figura 4- Gerador de triângulo textural..... | 52 |
| Figura 5- Ensaio de Sedimentação dos tratamentos SN (A), SN+10% (B), SN+15% (C) e SN+20% (D)..... | 54 |
| Figura 6- Pirâmide textural dos tratamentos SN (A), SN+10% (B), SN+15% (C) e SN+20% (D)..... | 57 |
| Figura 7- Curva dos valores médios de compactação para os tratamentos SN (A), SN+10% (B), SN+15% (C) e SN+20% (D)..... | 61 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Classificação dos RSS conforme RDC nº222/2018..... | 25 |
| Quadro 2 - Normas regulamentadoras de RSU e RSS | 28 |

ARTIGO

| | |
|--|----|
| Quadro 1- Nomenclatura dos tratamentos realizados..... | 53 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

ARTIGO

| | |
|---|----|
| Tabela 1-Valores médios da fração areia, silte e argila de um Latossolo Vermelho sem adição de cinza e com adição de cinzas de resíduos hospitalares | 55 |
| Tabela 2-Valores médios de limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade do solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares | 56 |
| Tabela 3- Valores médios das propriedades químicas do solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares..... | 58 |
| Tabela 4- Valores médios de teor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares | 60 |
| Tabela 5- Valores médios de expansão, massa específica aparente seca e Índice de Suporte Califórnia para os tratamentos de solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares..... | 62 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| % | Porcentagem |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| Al | Alumínio |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| CBR | Califórnia Bearing Ratio |
| CIGRES | Consórcio Intermunicipal de Gestão de Resíduos Sólidos |
| cm | Centímetros |
| CNT | Confederação Nacional de Transportes |
| CTC | Capacidade de Troca Catiônica do solo |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CV | Coefficiente de Variação |
| DOU | Diário Oficial da União |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FW | Frederico Westphalen |
| g | Gramas |
| GL | Grau de Liberdade |
| IP | Índice de Plasticidade |
| ISC | Índice de Suporte Califórnia |
| Kg | Quilogramas |
| km | Quilômetros |
| LL | Limite de Liquidez |
| LMCC | Laboratório de Materiais de Construção Civil |
| LP | Limite de Plasticidade |
| Min | Minutos |
| Mm | Milímetros |
| MO | Matéria Orgânica |
| MR | Módulo de Resiliência |
| NBR | Norma Brasileira |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |

| | |
|--------|--|
| PNMA | Política Nacional de Meio Ambiente |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| QM | Quadrado Médio |
| ReCESA | Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento |
| RDC | Resolução da Diretoria Colegiada |
| RH | Resíduos Hospitalares |
| RS | Rio Grande do Sul |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| RSS | Resíduos de Serviços da Saúde |
| SUCS | Sistema Unificado de Classificação de Solos |
| SiBCS | Sistema Brasileiro de Classificação de Solos |
| TRB | Transportation Research Board |
| UFSM | Universidade Federal de Santa Maria |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 2 OBJETIVOS..... | 22 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 22 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 22 |
| 2.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 22 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 23 |
| 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS | 23 |
| 3.1.3.1 Aterros | 29 |
| 3.1.3.2 Incineração | 30 |
| 3.2 SOLOS..... | 32 |
| 3.2.1 Propriedades e ensaios..... | 33 |
| 3.2.2 Estabilização de solos..... | 34 |
| 3.2.4. Estabilização química de solos aplicados à pavimentação | 36 |
| 3.3. PAVIMENTAÇÃO | 40 |
| 3.3.1 Tipos de pavimentos e materiais utilizados | 40 |
| 3.3.2 Base e sub-base do pavimento..... | 43 |
| 3.2.5 Critérios de dimensionamento de pavimentos..... | 44 |
| 4 ARTIGO: UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUO HOSPITALAR EM MISTURA COM SOLO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 46 |
| 4.1 RESUMO | 46 |
| 4.2 ABSTRACT..... | 46 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 47 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS | 49 |
| 2.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 49 |
| 2.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS | 51 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 54 |
| 4. CONCLUSÕES | 63 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 65 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 68 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |
| APÊNDICE A- FOTOGRAFIAS RETIRADAS DURANTE A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS..... | 78 |

| | |
|---|-----------|
| APÊNDICE B- ANÁLISE QUÍMICA DAS CINZAS DE RESÍDUOS HOSPITALARES FORNECIDAS PELA EMPRESA AMBIENTUUS | 84 |
| APÊNDICE C- ANÁLISES ESTATÍSTICAS E COMPARAÇÕES DE MÉDIAS | 91 |

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, uma das grandes problemáticas da sociedade é o consumo deliberado de matérias primas e recursos naturais. Estes recursos são escassos e influenciam diretamente na quantidade de resíduos gerados pelo homem. Tavares (2004) pontua que o volume de resíduos gerados anualmente é crescente, tendo grande relação com a expansão das cidades e o desenvolvimento da indústria. A fim de controlar a poluição, reduzindo os danos ambientais e melhorando a saúde da população, que inevitavelmente entram em contato com os resíduos produzidos por residências, indústrias e serviços da saúde, faz-se necessário uma intervenção, com o intuito de gerenciar de maneira mais eficaz os resíduos gerados.

Os resíduos possuem diversas origens, sendo algumas delas: agricultura, indústria, doméstico, comercial, construções, hospitalares dentre outros. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) dispõe sobre a caracterização dos resíduos sólidos, sendo que é realizada de acordo com os processos pelos quais eles percorrem até chegar ao final da sua utilização. Para isso é necessário identificar a matéria prima, insumos e os processos aos quais os resíduos foram submetidos. Assim, conforme ABNT (2004), os resíduos sólidos podem ser classificados em dois grupos: Classe I perigosos e Classe II não perigosos (Inertes e não inertes).

Por meio do processo classificatório dos resíduos, distintas técnicas podem ser aplicadas a fim de gerenciar e fornecer uma disposição final adequada a estes materiais. Entretanto, os métodos mais utilizados para destinação de resíduos encontram-se sobrecarregadas, devido a sua excessiva produção, ocasionando sérios problemas ambientais. O meio ambiente é incapaz de absorver tanto material em um curto período, conseqüentemente este acaba passando por uma destinação inadequada, o que é altamente prejudicial a natureza afetando a vida atual e das próximas gerações (COSTA; FONSECA, 2009).

Para Russo (2003), uma alternativa que visa aprimorar e tornar mais eficaz a gestão dos resíduos é o uso conjunto de diversas técnicas, bem como: a reciclagem, redução, reutilização, compostagem, aterramento, incineração de resíduos e a adoção de programas de educação ambiental com participações comunitárias. De acordo com o mesmo autor, resíduos perigosos tal como os resíduos hospitalares, requerem alternativas de tratamentos mais seguras do que resíduos urbanos em geral. A incineração é uma das técnicas que podem ser adotadas para eliminar resíduos tóxicos e perigosos a saúde. Tendo como característica a redução de até 90% o volume dos resíduos. Durante o seu processo inicial de queima é produzido energia e no final,

após a queima são originadas as cinzas que podem ser utilizadas em distintos contextos e possuindo variadas aplicações.

A pavimentação é caracterizada por obras de infraestrutura, e que para sua realização necessitam de matérias primas escassas e nem sempre encontradas in loco. O principal material constituinte das camadas utilizadas para construção de pavimentos é o solo, entretanto este nem sempre possui as propriedades necessárias para essa utilização, pois as propriedades e características dos solos são oriundas de seus processos de formação, mudando de local para local. Os solos são provenientes da decomposição das rochas, da ação do clima, do relevo e do tempo que esses fatores estão atuando sobre o material de origem, podendo possuir diferentes cores, texturas e propriedades. Algumas propriedades do solo são facilmente alteradas e outras não, por isso a necessidade de desenvolver técnicas para melhorar as características de um determinado solo.

Atualmente o modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil, onde os pavimentos servem tanto para o transporte de cargas com veículos pesados quanto como meio de transporte para os veículos de passeio, logo a demanda por solos e materiais utilizados na pavimentação torna-se ainda maior, pois um pavimento bem executado e preservado influencia diretamente no desempenho dos transportes e na economia do país. De acordo com Elias et al. (2017), com o intuito de utilizar técnicas mais sustentáveis e preservar os recursos naturais, têm se utilizado novas matérias primas em obras geotécnicas. Visando a redução dos custos e os impactos ambientais ocasionados na construção destas obras, Bernucci et al. (2008) enfatizam que os custos para execução de pavimentos são elevados e sendo possível utilizar o solo da região, há uma significativa redução desses custos, principalmente com o transporte.

A utilização de cinzas de resíduos hospitalares em camadas de pavimentos visa contribuir com a melhoria das propriedades dos solos. Permitindo sua posterior utilização em obras rodoviárias, contribuindo na redução dos volumes de resíduos gerados e dispostos na natureza. A melhoria do solo só é possível devido as propriedades aglomerantes das cinzas, influenciando diretamente nas propriedades do solo e sua expansão. Além de contribuir diretamente com a destinação final de resíduos perigosos, pois ao misturar esse material com o solo natural e inseri-lo nas camadas de pavimentos, a possibilidade de contaminação pelo ar, chuvas ou contato direto com pessoas pode ser consideravelmente reduzida.

Com base neste contexto, esta pesquisa propõe avaliar os impactos decorrentes da substituição parcial de um solo natural, por cinzas oriundas de resíduos hospitalares, quanto a

alteração de suas propriedades e seu comportamento mecânico, a fim de utilizá-lo posteriormente em camadas de pavimentos flexíveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as implicações decorrentes da mistura de um solo natural com cinzas oriundas de resíduos hospitalares, visando posteriormente a sua aplicação nas camadas de pavimentos flexíveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as características físicas e a classificação do solo natural e das cinzas de resíduos hospitalares;
- Verificar as reações físicas, químicas e mecânicas do solo natural e misturas de solo/cinza de resíduos hospitalares em distintas proporções;
- Avaliar as reações físicas, químicas e mecânicas, da utilização do solo natural e misturas de solo/cinza de resíduos hospitalares, através da realização de ensaios de análise química do solo/cinza e índice de suporte Califórnia;
- Verificar quais os teores das misturas de solo natural + cinzas de resíduos hospitalares possuem propriedades necessárias para aplicação na camada de pavimentos.

2.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 6 capítulos. No capítulo 1, foi abordado a introdução e a relevância da pesquisa. No capítulo 2, os objetivos e estrutura da dissertação. O capítulo 3 encontra-se a revisão bibliográfica, dando ênfase nos principais temas da pesquisa: origem, classificação e destinação de resíduos; formação, propriedades e utilização de solos e as características, tipos e materiais utilizados para construção de pavimentos. No capítulo 4, abordou-se a metodologia utilizada no trabalho. Através da descrição e análise dos ensaios laboratoriais, características dos materiais empregados, bem como a localização das jazidas dos solos utilizados e da cinza de resíduos hospitalares. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais encontram-se apresentados e analisados no capítulo 5. O capítulo 6 retrata as considerações finais da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros, seguido das referências bibliográficas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No referencial teórico será retratado de modo geral as principais referências desta dissertação. Descrevendo os tipos de resíduos, sua classificação, principais riscos e tratamentos que podem ser realizados. Em um segundo momento, abordando conceitos básicos da formação dos solos, bem como, suas propriedades e aplicações em obras geotécnicas, seguido da importância e utilização de pavimentos no transporte de cargas e passageiros, tipos de pavimentos, materiais utilizados, propriedades e custos.

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Anualmente o volume de resíduos urbanos gerados se expande, isso ocorre devido ao elevado desperdício de materiais. Um dos grandes fatores que influenciam no aumento de resíduos é o descaso com a durabilidade dos produtos consumidos (CUNHA; SILVA, 2017). Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são materiais indesejados, provenientes de pessoas que não querem mais fazer seu uso e realizam seu descarte. Sendo que são oriundos das mais diferentes atividades e possuem vastas funções. Entretanto, se descartados de maneira inadequada eles podem causar grandes riscos ao ambiente (SANTOS, 2012).

Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são provenientes de serviços industriais, agrícolas, hospitalares, comerciais, industriais e domésticos, podendo se encontrar no estado sólido e semissólido. Também se incluem líquidos que não podem ser enviados para rede pública ou lançados diretamente em corpos de água.

Para Zanta e Ferreira (2003), as características dos resíduos sólidos variam de acordo com diferentes aspectos tais como: culturais, socioeconômicos, climáticos e geográficos. Sendo que estes também são fatores que particularizam cada comunidade ou região. Estes materiais possuem inúmeras características em relação a sua composição biológica, que também é diretamente influenciada por as condições ambientais expostas.

Em países em desenvolvimento, como o caso do Brasil, uma das grandes dificuldades é a lacuna existente na gestão de RSU. Implicando diretamente no aumento de doenças e na geração de gases de efeito estufa. O aumento de gases gerados implica diretamente no aquecimento global, chamando a atenção para a capacidade de suporte do planeta e como irá ser o futuro das próximas gerações. De um ponto de vista consciente e ecologicamente correto a maior preocupação deveria ser a não geração de resíduos seguidos da: reutilização,

reciclagem, compostagem, recuperação energética, ou seja, a dar a destinação final adequada a estes materiais (GODECKE; NAIME; FIGUEIREDO, 2012).

Günther (2008) pontua que em áreas com elevada densidade populacional o volume de resíduos produzidos é maior e não há locais adequados para a sua disposição, que reflete diretamente nos problemas socioeconômicos de uma região. A disposição inadequada leva a criação e propagação de bactérias e parasitas e ao ser exposto ou entrar em contato com este tipo de material, seja em um longo ou curto período há grandes chances de contaminação, acarretando graves problemas de saúde. Sendo este um fator crucial e de suma importância, é necessário fazer uso de alternativas a fim de evitar estes problemas e amenizar os impactos ambientais.

3.1.1 Resíduos hospitalares

Santos (2013) destaca que a demanda de serviços na área da saúde aumentou com o decorrer dos anos e o crescimento populacional, fator este que implica diretamente na quantidade de Resíduos Hospitalares (RH) gerados. Deste modo, pode-se comentar que a disposição de RH transcorre em muitos casos de maneira errônea, tendendo a se prolongar com o decorrer tempo, gerando inúmeros riscos ao meio em que eles estão inseridos. Diversas estratégias veem sendo adotadas a fim de aperfeiçoar a gestão destes materiais, bem como a disseminação de maiores informações e a formação de novos profissionais capacitados. Estas alternativas têm por objetivo minimizar e limitar o contato de resíduos como meio ambiente.

A responsabilidade de cuidar da saúde da população é garantida pelos hospitais que conseqüentemente produzem resíduos para poder realizar os tratamentos necessários. Os RH podem ser divididos em algumas classes, de acordo com a sua semelhança e propriedades. No Brasil, a norma responsável pela classificação dos Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) é a NBR 1208/1993 (ABNT, 1993), nela são descritos os seus respectivos riscos à saúde pública e ao meio ambiente, permitindo a sua gestão adequada. Em síntese, eles são classificados em três classes:




- Classe A: São os resíduos infectantes encontrados em laboratórios, salas e materiais utilizados em cirurgias, restos alimentícios e materiais orgânicos. Podendo ser encontrados em diferentes formas, sendo algumas delas: vacinas vencidas, agulhas, tecidos, soro, sangue, parte de animais e refeições.

- Classe B: Resíduos especiais tal como os materiais químicos, farmacêuticos e radioativos. Tem como fontes produtoras clínicas e laboratórios, na maioria dos casos encontrado em materiais que são: corrosivos, reativos, tóxicos, radioativos e contaminantes.
- Classe C: Materiais que não se enquadram nas classes A e B, podendo ser nomeados como comuns. Similares aos resíduos de origem doméstica, tendo como exemplo resíduos de serviços administrativos ou materiais que não estiveram expostos a pacientes, sendo assim contendo um baixo risco à saúde.


Outra maneira de classificar os resíduos pode ser de acordo com a Resolução RDC nº222/2018 (ANVISA, 2018), que tem por objetivo regulamentar o gerenciamento de resíduos oriundos de serviços da saúde e tomar outras providências em relação a eles. Essa normativa não diferencia os resíduos de acordo com sua atividade, ou órgão gerador, mas abrange no geral todos os serviços que gerem resíduos relacionados a área da saúde ou resíduos similares. De acordo com esta resolução podemos classificar os resíduos de acordo com a Quadro 1.

(continua)

Quadro 1- Classificação dos RSS conforme RDC nº222/2018

| GRUPO | DESCRIÇÃO | SÍMBOLO |
|-------|---|---|
| A | Resíduos que possivelmente contenham agentes biológicos e possam ocasionar infecções |  |
| B | Resíduos que possuem produtos químicos e oferecem riscos ao meio ambiente ou à saúde pública, podendo ter características de corrosividade, toxicidade, inflamabilidade e reatividade |  |
| C | Rejeitos que são radioativos |  |
| D | Resíduos que não oferecem riscos radiológicos, biológicos ou químicos tanto para o meio ambiente quanto à saúde pública, sendo estes equivalentes aos resíduos domiciliares | Deve ser identificado conforme definido pelo órgão de limpeza urbana |

(Conclusão)

| | | |
|---|---|---|
| E | Resíduos que são perfurocortantes ou escarificantes, por exemplo: agulhas, lâminas de barbear ou bisturi, ampolas de vidro, espátulas e todos os utensílios de vidros quebrados em laboratórios |  RESÍDUO PERFUROCORTANTE OU PERFUROCORTANTE |
|---|---|---|

Fonte: Anvisa RDC nº222/2018 (ANVISA, 2018).

Os materiais informativos e didáticos nesta área são escassos e alguns trabalhos que mais se destacam nesta área são dos autores estrangeiros como o caso de Rutala e Sarubbi (1983) e Tavares (2004), que pontuam em seus trabalhos os riscos oriundos de resíduos hospitalares, abordando também como é feita a sua classificação e gestão.

Para Santos (2013), na maior parte dos casos os RH são produzidos em unidades de saúde, representando uma fração significativa do total de resíduos gerados no Brasil. A destinação e tratamento destes é embasada nos procedimentos realizados por países de primeiro mundo, os quais utilizam uma legislação cautelar, quando se trata de materiais perigosos, que requerem um tratamento especial. Países desenvolvidos amiudadamente recomendam o processo de incineração, a fim de eliminar os agentes contaminantes presentes em resíduos perigosos.

Coordenar a disposição de materiais contaminados, está correlacionado com a redução de impactos ambientais. Tendo em vista, que quando dispostos e armazenados de maneira inadequada, levam a contaminação da população e da natureza. Como no caso do solo e da água. Logo entende-se, que realizar a disposição de maneira eficaz, resulta em um equilíbrio ambiental, o que estimula e fundamenta a disseminação de maiores informações à população (COSTA; FONSECA, 2009). Ainda de acordo com o mesmo autor, obter um local exclusivo para armazenagem de resíduos de origem hospitalar é fundamental para se evitar a contaminação. Deste modo, pode-se atingir um maior controle de pessoas que tem acesso ao local, tornando acessível apenas a pessoas autorizadas, as quais tem conhecimento de como proceder com os resíduos, evitando o contato de maneira exposta com o meio ambiente e com animais.

Zanta e Ferreira (2003) citam a importância da gestão integrada de resíduos, se referindo não apenas as alternativas adotadas na destinação, mas também na redução da quantidade gerada e na não geração. Para implementar as procedências a serem tomadas, deve se considerar os fatores econômicos, sociais e administrativos regulamentados por normativas,

agências financiadoras e instituições. Este processo deve ser acompanhado e de responsabilidade não apenas dos órgãos governamentais, mas também pelo setor privado e da sociedade em geral. Ainda de acordo com os mesmos autores, ações como o tratamento e reaproveitamento de resíduos, geram impactos positivos do ponto de vista ambiental. Outros fatores decorrentes são: a redução de materiais poluentes dispostos na natureza e de recursos naturais retirados do meio ambiente.

3.1.2 Tratamento e disposição final

A gestão adequada de resíduos ocorre de maneira mais hábil, quando consideramos todos os fatores que influenciam e fazem parte dos resíduos gerados. Sendo de suma importância para isto o processo de identificar a origem dos resíduos, bem como a sua classificação e o potencial contaminante que estes oferecem ao seu entorno. Deste modo, pode-se realizar uma análise aprimorada, com o intuito de verificar os perigos que podem ser ocasionados e a maneira mais eficaz de se evitar possíveis contaminações e problemas ambientais, bem como identificar formas eficientes de recuperação, tratamento e disposição final (CASTRO et al., 2007).

Machado e Moraes (2004) ressaltam, que atualmente existem diversas tecnologias que podem ser adotadas para o tratamento de resíduos sólidos e resíduos oriundos do serviço da saúde. Entretanto, há poucas pesquisas na área no âmbito mundial, o que dificulta a tomada de decisão para qual tratamento adotar. Encontram-se disponíveis no mercado diversas alternativas a serem adotadas, sejam elas de custo elevado e que demanda mão de obra especializada, ou até mesmo tecnologias mais acessíveis do ponto de vista financeiro e que necessitem de uma gestão simplificada.

De acordo com o mesmo autor, devido à falta de pesquisas e estudos na área elas são consideradas como uma alternativa duvidosa, logo, constata-se que não existe apenas uma metodologia ideal a ser empregue para o tratamento de resíduos, e sim uma combinação de diversas alternativas, que melhor se adequam para a situação, que sejam viáveis financeiramente, e permitam ser administradas facilmente, garantindo um controle de tratamento e disposição final eficazes a longo prazo. Pontua-se ainda que outro fator a ser levado em consideração na hora da escolha do tratamento e disposição final, são as características culturais, socioeconômicas, geográficas e ambientais de determinada região,

devido à grande diversidade cultural e geográfica do país, a fim de garantir a melhor gestão dos resíduos.

Pode-se citar algumas das principais normas regulamentadoras de gerenciamento e destinação de resíduos no Brasil, elas têm a função de nortear e regulamentar como dever ser feito seu tratamento e disposição final, além de garantir uma melhor gestão deles. Estas normas têm o intuito de proteger o meio ambiente, e melhorar a gestão dos resíduos sólidos e resíduos de serviços da saúde, sendo elas apresentadas na Quadro 2.

Quadro 2- Normas regulamentadoras de RSU e RSS

| | |
|---------------------|--|
| PNMA N°6938/1981 | Política Nacional de Meio Ambiente |
| PNRS N° 12.305/2010 | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| NBR 10.004/2004 | Resíduos sólidos classificação |
| CONAMA N° 313/2002 | Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais |
| CONAMA N° 316/2002 | Sistemas de Tratamento Térmico de Resíduos |
| CONAMA N° 264/1999 | Coprocessamento de resíduos |
| CONAMA N° 358/2005 | Tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde |
| RDC N° 33/2003 | Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde |
| RDC N°222/2018 | Práticas para o gerenciamento de resíduos de serviços da saúde |

Fonte: Autor (2022).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal N°12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), a destinação final ambientalmente adequada acontece quando se realiza o reaproveitamento dos resíduos após seu uso, fornecendo a este uma nova finalidade como: a reutilização, reciclagem, recuperação, aproveitamento energético e a compostagem. A disposição final ambientalmente adequada efetua-se ao realizar a distribuição de rejeitos em aterros, de acordo com normativas específicas a fim de se evitar e minimizar os danos ambientais e a saúde pública. O gerenciamento dos resíduos são o conjunto das ações aplicadas direta ou indiretamente durante o processo de: coleta, transporte, tratamento, destinação e disposição final. Este processo segue de acordo com o plano de gestão de resíduos sólidos apresentados na lei federal ou municipal.

Os recursos naturais que são utilizados como fonte de matéria prima são recursos finitos. Deste modo, frisa-se a importância desta percepção afim de reduzir gradativamente seu consumo ao longo dos próximos anos. Além disto, evidencia-se maneiras de como estes materiais podem vir a ser reutilizados e reciclados, ao realizar estas ações, prolonga-se a vida útil de um aterro sanitário, além de se evitar possíveis contaminações ambientais, devido a destinação final inadequada ou ineficaz, por fim reduzindo a poluição e consequentemente auxiliando na preservação dos recursos naturais como o solo e a água (CASTRO et al., 2007).

3.1.3.1 Aterros

Aterros sanitários podem ser considerados tanto como um tratamento de resíduos, mas também como uma forma apropriada de disposição final. Nele os resíduos sólidos são dispostos sobre o terreno natural, formando camadas de confinamento cobertas com solo. Durante o processo de decomposição, ocorrem diversos processos físico-químicos e biológicos, resultando em uma massa mais estável química e biologicamente, o que leva a formação de líquidos e gases, estes devem ser coletados e tratados adequadamente, além do monitoramento geotécnico e ambiental de todo o aterro (ReCESA, 2008).

Conforme prescrito na RDC Nº33 de 2003 (ANVISA, 2003), aterros sanitários são considerados como uma metodologia de destinação final de RSU no solo, sendo enclausurado em camadas cobertas por material inerte, devendo seguir normativas e etapas a fim de preservar o meio ambiente, sem ocasionar danos. Já os aterros industriais, tem por objetivo ser um local de destinação final de resíduos químicos, que são gerados por indústrias e que possuem grande potencial contaminante, os procedimentos adotados são diferentes de um aterro sanitário, utilizando técnicas específicas para o enclausuramento destes resíduos, com a finalidade de diminuir ou impossibilitar que ocorram danos à saúde pública e meio ambiente.

A RDC Nº 222 de 2018 (ANVISA, 2018) descreve aterros de resíduos perigosos como locais que são destinados receberem materiais com variados riscos à saúde pública e ao meio ambiente, podemos identificar e classificar estes materiais como:

- Resíduos de animais: carcaças e cadáver de animais;
- Risco 1: agentes biológicos de baixo risco para a sociedade e indivíduo, estes não originam doenças;
- Risco 2: agentes biológicos de médio risco para a sociedade e indivíduo, podem causar problemas de saúde pública como infecções, entretanto seu contágio é delimitado e encontram-se tratamentos eficientes para estes problemas.
- Risco 3: agentes biológicos com risco médio para a comunidade e alto para a saúde individual, podem ser propagados via ar e ocasionar doenças e até serem fatais, podendo ser transmitido de um indivíduo para outro. Entretanto existem medidas preventivas e de tratamento para estas doenças.
- Risco 4: agentes biológicos de alto risco para a sociedade e indivíduo, são propagados com grande facilidade, principalmente para quem os controla e manuseia. Não possuem

alternativas que podem ser adotadas para sua prevenção e nem de tratamento para as doenças ocasionadas por eles.

No momento em que os resíduos são depositados em aterro, sem as precauções necessárias de gestão, controle e tratamento adequado, há possibilidade ocasionar o efeito reverso. Desta forma, provocando a contaminação do solo, água e meio ambiente, causando danos que podem vir a ser irreversíveis. Logo destaca-se a importância de cuidados básicos durante o processo de disposição final em aterro (CASTRO et al., 2007).

Para Dias (2012), é de suma importância que ocorram mais e incentivos na área de gestão de resíduos. A gestão dos resíduos sólidos carece de mais atenção, com mais incentivo financeiro, regulamentação e apoio da sociedade em geral. Deste modo, pode-se reduzir os impactos ambientais causados, tal como a preservação dos recursos ambientais. Outro fator importante a ser considerado, para uma melhor evolução nesta área são a realização conjunta de programas como: a coleta seletiva, redução de geração de resíduos na fonte e campanhas de arrecadação resíduos específicos diretamente nas comunidades e bairros.

Conforme Borba (2016), uma alternativa a ser adotada a fim de minimizar os custos de implantação e manutenção de um aterro sanitário, é o consórcio público entre pequenos municípios, que não teriam condições de manter sozinhos um aterro sanitário. Um exemplo de consórcio de aterro sanitário criado com o intuito de tratamento e destinação final de RSU é o Consórcio Intermunicipal de Gestão de Resíduos Sólidos (CIGRES), situado no município de Seberi/RS, na BR 386, km 43, Linha Osvaldo Cruz, criado no ano de 2007, formado atualmente por 31 municípios localizados em região próxima ao aterro. A Tabela 01 representa os municípios consorciados ao CIGRES e suas populações.

3.1.3.2 Incineração

Segundo Monteiro et al. (2001), no tempo atual, existem diversas opções de tratamento para os RSS, sendo um dos tratamentos mais utilizados o processo de incineração. Ao longo dos anos além de que o avanço tecnológico na área, a conscientização ambiental da população também aumentou, em decorrência disto foram definidos alguns critérios mínimos a serem atendidos durante o tratamento de resíduos, sendo eles:

- Diminuição da carga biológica presente, atendendo os padrões mínimos de eliminação e desinfecção de acordo com norma;
- Respeitar o padrão de emissão de efluentes como gases e líquidos;

- Deformação dos resíduos em relação a sua forma inicial, não permitindo seu reconhecimento como resíduo de origem hospitalar;
- Ser viável financeiramente, mantendo uma quantidade relevante de resíduos a serem incinerados.

Conforme descrito por ReCESA (2008), o tratamento de resíduos sólidos ocorre através da adoção de diversas técnicas, sendo empregues com o intuito de reduzir a quantidade, volume e seu potencial contaminante. Entretanto, antes de escolher o tipo de tratamento a ser aplicado deve-se dar importância às características do resíduo, a fim de adotar um sistema de tratamento mais eficaz do ponto de vista técnico. Algumas opções que podem ser escolhidas como forma de tratamento são: compostagem, reciclagem e incineração. A incineração ocorre através do processo de queima dos resíduos, onde há presença farta de oxigênio e conseqüentemente ocorre a decomposição dos materiais à base de carbono, gerando calor e cinza.

De acordo com Monteiro et al. (2001), existem poucas usinas de incineração instaladas no Brasil, sendo estas utilizadas apenas para incineração de resíduos oriundos de serviços da saúde e de aeroportos. Entretanto, ressalta-se que os custos deste tipo de tratamento são elevados, seja para instalação, manutenção, e operação do sistema, de modo a evitar a poluição do ar durante o processo de queima, necessitando de filtros e demais tecnologias. A incineração tem como vantagem a redução de volume de resíduos, além de que as cinzas produzidas na queima são consideradas como resíduo inerte, desde que o processo de queima ocorra corretamente.

Um estudo realizado por Morgado e Ferreira (2006), visa a implementação de uma usina de incineração de resíduos na região de Goiânia no estado de Goiás, os resultados obtidos durante a pesquisa foram positivos, pois ao adotar o processo de incineração a vida útil dos aterros sanitários será prolongada, e a necessidade da criação de novos espaços para aterros será reduzida, pois o volume de resíduos disposto em aterro sanitário após o processo de incineração é significativamente menor. A incineração tem como benefício a diminuição de aproximadamente 90% do volume dos resíduos além de uma redução de 15% do peso, quando comparado ao seu estado inicial. Outro ponto a se destacar é que durante o processo de incineração ocorre a cogeração de energia, que pode ser utilizada para redução dos custos de operação da usina de incineração, pois durante o processo de queima dos resíduos ocorre a liberação de calor que pode ser convertido em energia.

As cinzas resultantes do processo de incineração de resíduos, geram um novo material que pode ser utilizado na geotecnia. O crescimento de cinzas no solo é capaz de melhorar as suas propriedades mecânicas, criando um novo material.

3.2 SOLOS

Para Neves et al. (2009), o solo é um material oriundo da decomposição das rochas que formam a crosta terrestre, cujas características dependem da composição química e mineralógica da rocha de origem. A classificação do solo pode ser realizada de três principais maneiras:

- Genética: solo pedogenético, saprólito ou transportado;
- Granulométrica: arenoso, argiloso ou siltoso;
- Pedológica: horizontes superficiais, subsolo e rocha mãe.

O solo é uma matéria prima em abundante quantidade e indispensável para a construção civil. Devido a sua vasta utilização, se faz necessário conhecer suas propriedades e o seu comportamento nas mais variadas circunstâncias (GREGÓRIO, 2010). Para identificar propriedades como a granulometria de um solo deve-se seguir os passos indicados na NBR 7181/2016 (ABNT, 2016), já para obter características como plasticidade e consistência os ensaios a serem realizados devem seguir a NBR 6459/2016 (ABNT, 2016) e a NBR 7180/2016 (ABNT, 2016), deste modo pode-se identificar melhor suas propriedades, características e aplicações.

Conforme Villibor (2009), os solos de regiões tropicais possuem características e comportamento muito peculiares O primeiro denominado como Latossolo, proveniente do processo de Latlização do solo. Neste processo ocorre uma transformação da parte superior do subsolo, originado pela ação do intemperismo em solos superficiais, encontrados em regiões tropicais e úmidas. O processo de latolização enriquece o solo com óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, conservando a caulinita como argilomineral predominante ou exclusivo. O argilomineral presente no solo é responsável por fornecer ao solo seu comportamento e coloração.

De acordo com o Villibor (2009), o segundo grupo de solo tropical é nomeado como saprolítico, oriundo do processo de decomposição ou desagregação da rocha mãe através da ação do intemperismo. Essa camada de solo está localizada abaixo da camada superficial laterítica, considerado como residual, pois suas partículas constituintes residem no mesmo local

desde o seu estado pétreo. Possui classificação mineralógica complexa, devido a alguns argilominerais presentes ainda estarem em fase de decomposição.

Uma das metodologias que podem ser adotadas para classificação de solos é a da EMBRAPA (2018), no manual publicado está descrito o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), este apresenta a classificação dos solos encontrados no país e a suas principais características, origem e classificação.

Para Pessoa (2004), existem diferentes sistemas que podem ser utilizados para classificar os solos. Mesmo analisando o solo em diferentes aspectos e considerando suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, não é possível prever seu real comportamento, apenas estimá-lo. A fim de se obter o possível comportamento de um solo e suas possíveis utilizações, realizam-se diversos ensaios laboratoriais. Os resultados encontrados permitem identificar quesitos como composição granulométrica, argilominerais presentes, densidade, presença ou falta de minerais, possíveis agentes contaminantes, resistência, dentre outras características. Cada metodologia a ser ensaiada e determinada varia de acordo com a normativa que a prescreve.

3.2.1 Propriedades e ensaios

Para identificar as propriedades mineralógicas do solo, bem como a sua estrutura, é necessário a realização de ensaios específicos. Outro fator que deve ser considerado para detalhar o comportamento de um determinado solo, é as características climáticas do local de sua origem. Os ensaios laboratoriais permitem a identificação de propriedades importantes dos solos bem como: comportamento mecânico, índices físicos, granulometria e limites de Atterberg (MENDES, 2008).

Segundo Alves (2019), as características dos materiais utilizados em pavimentos são de materiais finos e granulares. Sendo assim, solos são os materiais mais utilizados para fazer parte das camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Entretanto, se faz necessário conhecer suas propriedades, a fim de verificar se suas características suprem as necessidades projetadas. Logo para conhecer as características destes materiais, alguns dos ensaios mais comuns a serem utilizados são: análise granulométrica, limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade. Além de ser necessário conhecer sua capacidade mecânica através do Índice de Suporte Califórnia (ISC), identificar estas características nos materiais é suma importância para verificar a possibilidade de aplicar estes materiais em pavimentos.

Alguns solos não possuem as características aceitáveis para sua utilização na construção, necessitando de uma intervenção para melhorar estas propriedades, sendo possível através da estabilização química que se baseia na adição de cal, cimento ou outros aditivos no solo natural (AYALA, 2020). Em pavimentação, conforme Brito e Paranhos (2017), o processo de estabilização de solos é recomendado para modificar as propriedades de um solo *in situ* de sua construção de modo que o mesmo passe a atender os requisitos necessários, permitindo a sua utilização, já que o solo é aplicado em diversas camadas que fazem parte de um pavimento.

O setor de obras da engenharia utiliza em grande escala recursos naturais, sabe-se que atualmente as jazidas de solos com qualidade necessária para aplicação em camadas de pavimentos vem reduzindo significativamente, inversamente proporcional a quantidade de resíduos que é produzida cada vez em mais quantidade. Dito isso, ressalta-se a importância pesquisas e técnicas que tenham por objetivo reduzir a quantidade de recursos naturais extraídos. Uma alternativa que pode ser considerada é a utilização de rejeitos que seriam descartados em aterros para a execução de camadas de pavimentos, sendo essa uma solução técnica para redução de resíduos dispostos em aterro e econômica de modo a reduzir os custos de execução de um pavimento (ALVES; MARQUES, 2021).

3.2.2 Estabilização de solos

De acordo Malanconi (2012), para poder utilizar o solo *in natura* diretamente como camada de pavimento, este deve satisfazer alguns critérios pré-estabelecidos, sendo estes de: resistência, deformabilidade e permeabilidade. A estabilização do solo é uma prática que vem sendo estudada e aperfeiçoada, considerada como uma grande preocupação de pesquisadores na área geotécnica e da engenharia civil. Pode-se entender como estabilização todos os procedimentos que têm como intuito melhorar e estabilizar as propriedades do solo natural. As propriedades a serem melhoradas podem se referir a capacidade de suporte do solo, expansibilidade, permeabilidade, entre outros fatores (BASTOS et al., 2016).

De acordo com Núñez (1991), os diversos métodos podem ser adaptados e empregados para estabilização de um solo, variando de acordo com o que melhor se adequa ao local projetado. Para a escolha do melhor método a ser empregado na estabilização, deve-se considerar alguns fatores como: as propriedades do solo natural, as propriedades a serem obtidas no solo através da estabilização e os efeitos ocasionados no solo após sua estabilização. Para fins de pavimentação, França (2003) cita a estabilização química e a estabilização

mecânica como as mais utilizadas. Além dessas, pode-se destacar ainda a estabilização granulométrica.

Para Cristelo (2001), a estabilização mecânica ocorre por meio de um processo que organiza e permite a melhor distribuição das partículas do solo, de modo a ajustar a granulometria do solo e corrigir sua composição. Em casos em que o solo *in natura* não possui as propriedades necessárias para utilização pode-se adotar a estabilização mecânica, tendo em vista realizar a correção de sua granulometria e conseqüentemente de suas propriedades, deste modo a estabilização mecânica permite que o material estabilizado atenda aos requisitos necessários de projeto (ALMEIDA, 2010).

Na estabilização mecânica não ocorre a colocação de materiais ao solo, as suas propriedades são melhoradas devido o processo de compactação. A compactação ocorre devido a aplicação de uma energia sobre o solo, o que gera um aumento da resistência mecânica, capacidade de carga, durabilidade e densidade do solo, e, reduz o volume de vazios e dos poros presentes no solo. Estas alterações impedem que ocorra a erosão do solo, que é originada pela percolação de água (SANTOS, 2012). Sartori (2015), afirma que a estabilização mecânica é uma técnica de estabilização que pode ser utilizada tanto como um método único de estabilização ou pode que pode vir a complementar outros métodos de estabilização de solos.

A estabilização granulométrica é obtida através da adição ou retirada de partículas do solo. Os solos são materiais constituídos por diversas partículas que podem ser coligadas e conformadas de acordo com sua granulometria, ou seja, as dimensões de seus. Em cada faixa granulométrica, o solo possui distintas características, as quais definem o seu comportamento. A adição ou remoção de partículas pode ser realizada com mais de um tipo de material, sendo que este material pode possuir diferentes granulometrias a fim de alcançar e controlar as propriedades desejadas (NEVES et al., 2009; SARTORI, 2015).

Com a estabilização granulométrica, as propriedades e características de um determinado solo são modificadas, o que pode gerar um aumento da sua rigidez e da sua resistência ao cisalhamento. Técnicas de estabilização e reciclagem de pavimentos permitem a redução de custos para uma obra além de contribuir diretamente com o meio ambiente, o que incentiva diretamente na necessidade da adoção das mesmas, substituindo materiais comumente utilizados por materiais estabilizados de mesmas propriedades (SPECHT et al., 2013).

A estabilização química pode ser alcançada através da colocação de aditivos químicos no solo. Este processo é obtido por meio da mistura do solo (material a ser estabilizado) com os aditivos químicos, passando por um processo de hidratação da mistura, e, na etapa final a

sua compactação. Os teores de aditivos utilizados devem ser determinados previamente, com a finalidade de melhor se alcançar as propriedades desejadas. A estabilização química é capaz de melhorar uma ou diversas propriedades do solo, tais como sua resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade (CRISTELO, 2001; SANTOS, 2012).

Segundo Sartori (2015), este tipo de estabilização realiza alterações permanentes na estrutura do solo, o que reflete diretamente nas suas propriedades físicas e mecânicas. Os aditivos responsáveis por essas alterações são variados e possuem diversas origens, alguns bem conhecidos e facilmente encontrados na construção civil, como a cal e o cimento Portland. Para Santos (2012), outros aditivos que podem ser utilizados neste tipo de estabilização são betumes e pozolanas.

Núñez (1991) pontua que a estabilização química permite a estabilização do solo através da troca de íons, precipitação, polimerização e oxidação. O processo de reações químicas no solo tem seu início acompanhado da hidratação do cimento Portland, o qual ocorre de maneira lenta e produz diversos cristais, como: etringita, portlandita, alita, belita e monossulfualuminato de cálcio hidratado, denominados Silicatos de Cálcio Hidratado (C-S-H) (BRITO; PARANHOS, 2017). Conforme Mehta et al. (1994), os C-S-H são os principais responsáveis pelo ganho de resistência da mistura, sendo que cada cristal citado anteriormente é responsável pela resistência em diferentes idades.

As principais reações químicas que ocorrem na estabilização utilizando a cal como aditivo (pozolânicas e permuta iônica), ocorrem de maneira um pouco diferente (CRISTELO, 2001). Estas reações geram aumento da resistência mecânica e capacidade de carga; redução da dilatação e retração, gerando melhoria da trabalhabilidade e características de compactação do solo.

Para a escolha do melhor método a ser empregado na estabilização deve-se considerar as propriedades do solo natural e seu comportamento após a estabilização. O principal objetivo do emprego e utilização de aditivos estabilizadores é tendo em vista a melhoria das propriedades e características mecânicas do solo, fornecendo a este maior estabilidade e resistência, o que permite seu emprego e o torna de grande serventia em obras de pavimentação rodoviária.

3.2.4. Estabilização química de solos aplicados à pavimentação

Segundo Malanconi (2012), o uso da estabilização química nas camadas do pavimento surge da ocorrência de que, em diversas obras viárias, o solo disponível não possui as

propriedades necessárias. Este tipo de estabilização visa aprimorar as condições estruturais e geotécnicas do solo natural, para que as exigências de projeto sejam atendidas. Conforme Balbo (2007), a técnica de estabilização química permite reduzir os custos de materiais e transporte, com a utilização do solo *in situ*. Este fica menos expansivo e, portanto, aplicável nas camadas de pavimentos.

Para Cardoso et al. (2016), o solo estabilizado pode ser aplicado nas camadas de base e sub-base de pavimentos. A aplicação do solo estabilizado nas diferentes camadas, varia de acordo com a resistência obtida no processo de estabilização. A designação solo-cimento, solo-cal e solo melhorado com cimento ou solo melhorado com cal, se referem às misturas de solo com diferentes teores de aditivo estabilizante.

A utilização de cinza de resíduos em geral, como por exemplo a cinza de casca de arroz, já vem sendo utilizada como matéria prima na construção civil. De acordo com um estudo feito no estado de Santa Catarina com um solo saprolítico, foram realizados ensaios a fim de verificar a possibilidade de seu uso para pavimentação, onde estabilizou-se quimicamente o solo/cinza pesada e se realizou misturas de solo/cinza pesada/cal em diferentes teores. Os resultados encontrados foram de que o solo e cinza pesada não podem ser aplicados de maneira individual na camada de pavimentos, entretanto quando misturados e estabilizados quimicamente com cal apresentam um bom comportamento, permitindo sua utilização na camada de sub-base de pavimentos flexíveis (FARIAS, 2005).

O grau de modificação das propriedades do solo irá variar de acordo com as características do tipo de solo, teor utilizado de aditivo, quantidade de água, o grau de compactação, tempo de cura e eficiência da mistura em caso de solos argilosos (SPECHT, 2000).

De acordo com Batalione (2007), a maioria das pesquisas que utilizam a técnica de estabilização de solos para pavimentação, utiliza como valores de agente estabilizante uma medida entre 0,50% à 7% de adição ao solo natural. As maiores diferenças nas propriedades do solo natural e estabilizado podem ser identificadas na redução de sua expansão, plasticidade, contração e massa específica e aumento da resistência mecânica, umidade ótima, durabilidade e rigidez.

Sartori (2015) realizou a estabilização de um solo da região de Campo do Mourão com três teores distintos de cimento, sendo eles: 7%, 10% e 13%. A resistência média aos sete dias à compressão simples foi de: 2 MPa, 2,83 MPa e 3,75 MPa, respectivamente. Com estes resultados o autor concluiu que é possível a aplicação do solo estabilizado quimicamente nas

camadas de base e sub-base de pavimentos, devido ao significativo aumento da resistência do solo. Os resultados da estabilização com solo cal obtidos pelo mesmo autor, aos sete dias de idade foram satisfatórios. Os teores com 3% e 7% de cal apresentaram RCS de 1,37 MPa e 1,82 MPa respectivamente, podendo ser aplicado na camada de sub-base de pavimentos, conforme norma ES-P 11/05 do DER/PR. Para o teor de 5% de cal, a resistência superou o mínimo de norma, chegando à 2,26 MPa, o que permite seu emprego na camada de base de pavimentos flexíveis.

Segundo Gregório (2010), o calcário é oriundo das rochas sedimentares formados de carbonatos de cálcio ou magnésio. Quando há a predominância de carbonato de magnésio a rocha será nomeada como calcário magnesiano, caso contrário, se houver maiores teores de cálcio, a rocha será nomeada de calcário calcítico. A utilização de cal como agente estabilizante visa proporcionar ao solo uma melhoria de sua qualidade, ou seja, torná-lo estável. Ayala (2020) cita que a mistura solo-cal contribui diretamente com a trabalhabilidade e aumento de resistência o que viabiliza a sua utilização em construções de pavimentos, isto ocorre devido ao processo de floculação da mistura, variando de acordo com o tipo de solo utilizado.

Sartori (2015) pontua que a cal é um aglomerante muito utilizado na construção civil e devido a ela ser um excelente reagente que torna o solo quase impermeável, aumenta a sua capacidade de suporte e fornece resistência ao intemperismo, o que permite sua utilização na pavimentação. Semelhante a mistura solo-cimento, a mistura solo-cal também é avaliada conforme o ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS). No Brasil ainda não existe um método de dosagem de solo/cal definido, sendo então utilizados valores de dosagens experimentais.

Ao realizar a mistura entre cal, água e solo, se inicia o processo de troca de íons e floculação, reação cimentante pozolânica e a carbonatação. Estas reações conferem ao solo um aumento do limite de plasticidade, diminuição do limite de liquidez e tornam o solo mais estável às variações de umidade. No âmbito da pavimentação, esta mistura pode ser utilizada tanto na camada de base como na de sub-base do pavimento (AZEVEDO, 2010).

Segundo a ABCP (2002), o cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil em todo o mundo, sendo um pó fino que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes, ligantes que endurece na presença de água. Com o passar dos anos foram sendo fabricados novos tipos de cimento, com diversas propriedades específicas para diferentes usos. A composição do cimento é constituída de clínquer e outras adições, como: escórias de alto forno, materiais pozolânicos, carbonáticos, gesso ou sulfatos de cálcio que compõem os diferentes

tipos de cimento. Outros fatores que também diferenciam os tipos de cimento são relacionados as suas propriedades específicas, bem como sua coloração e resistência.

O cimento tem função estabilizante conforme seu teor empregado na mistura, conferindo ao solo um aumento de resistência mecânica. Qualquer cimento do tipo Portland pode ser utilizado na estabilização química, entretanto esse deve respeitar aos critérios de que um cimento de má qualidade ou danificado não deve ser empregado. Na Quadro 02 está representado as principais características de solos estabilizados de acordo com o tipo de ação do cimento. Outros fatores que influenciam na estabilização é o tipo de solo, a quantidade de aditivo a ser empregada, o grau da mistura, o tempo de cura e a hidratação (CRISTELO, 2001).

De acordo com Pereira (2012), a estabilização química geralmente é realizada com o emprego de cimento e cal nos solos, melhorando suas propriedades, entretanto outro material pozolânico que pode ser utilizado na estabilização química são as cinzas. As cinzas são utilizadas com a finalidade de reduzir os custos com o tratamento de estabilização, além de aumentar a vida útil de aterros, pois permite uma nova empregabilidade para este tipo de resíduo, podendo ser aplicada em pavimentos de qualquer local do mundo.

Ainda conforme o mesmo autor, uma das grandes preocupações ambientais é qual a destinação para as cinzas de resíduos após o processo de incineração. Diversas pesquisas atualmente estudam possíveis aplicações das cinzas na construção civil, devido as suas propriedades. A empregabilidade deste tipo de material possui vasto campo na área de engenharia, como utilização para argamassas, cimentos e até mesmo na incorporação de concretos e asfaltos.

Ressalta-se que para utilização da técnica de estabilização de misturas utilizando solo-cinza ainda não existem normativas específicas para dosagem e estabilização de solos com este tipo de material. Deste modo a análise da viabilidade de sua utilização é realizada com base nos resultados obtidos no ensaio de ISC, de acordo com os valores alcançados no Califórnia Bearing Ratio (CBR) e expansão do solo-cinza.

De acordo com Silva (2005) em pesquisa realizada com solo/cinza pesada os resultados obtidos no processo de estabilização de solos, com objetivo de posterior aplicação em camadas de pavimentos, foi de que o solo com adição de cinzas obteve ganho de resistência mecânica, onde o comportamento das cinzas foi similar ao de materiais pozolânicos adquirindo resistência.

Conforme estudos realizados por Vizcarra (2010), a colocação de cinza de resíduos pode ser utilizada na estabilização química de solos, alterando características do solo natural como

resistência e expansão, de modo a modificar estas propriedades de maneira diferente, dependendo da quantidade adicionada ao solo. No estudo realizado, notou-se que um teor de 40% de cinzas adicionados ao solo *in natura* foi capaz de reduzir a sua expansão de 4,87% para 0,50% cerca de 10% a menos de expansão, passando a permitir a sua utilização para uso na pavimentação, aplicando este solo-cinza na camada de base de pavimentos flexíveis.

Para Batalione (2007), uma alternativa eficaz do ponto de vista ambiental e econômico é a substituição de matérias primas pôr a utilização de rejeitos. No âmbito da engenharia de pavimentos, através de diversas pesquisas aponta-se que a técnica de estabilização com rejeitos permite uma melhora das características dos solos, permitindo sua utilização nas camadas de bases e sub-base, de modo a reforçar e corrigir as propriedades dos solos *in natura*.

3.3. PAVIMENTAÇÃO

3.3.1 Tipos de pavimentos e materiais utilizados

A construção de pavimentos no Brasil teve início no século XIV e XVIII, onde foram realizados incentivos para construção de novas estradas. Entretanto destaca-se a necessidade de cuidados e manutenção que devem ser realizados para maior duração de um pavimento. Outro fator que deve ser observado e respeitado, são os critérios para dimensionamento dos pavimentos (BALBO, 2007). No ano de 1937 foi implantado o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), responsável pela manutenção, recuperação e construção de pavimentos interurbanos.

Conforme o Manual do DNIT (2006), o pavimento é um sistema de camadas com espessuras finitas, estando assente em um terreno ou fundação, denominado de subleito. As suas finalidades são técnico-econômicas, e, para desempenhar adequadamente suas funções, necessita de diferentes camadas e materiais.

O pavimento é uma estrutura estratificada que tem por objetivo suportar os esforços a ele submetidos através da ação do tráfego e do intemperismo. Para resistir aos esforços impostos, o pavimento possui múltiplas camadas com espessuras pré-determinadas em projeto. Os materiais que compõem estas camadas possuem diferentes resistências e deformações, o que torna seu dimensionamento e cálculo bastante complexo. As camadas do pavimento são assentadas sobre a superfície final da terraplenagem, tendo como objetivo fornecer aos usuários segurança, conforto, economia e boas condições de rolamento. As principais camadas

constituintes de um pavimento são: o revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (DNIT, 2006; BERNUCCI et al., 2008).

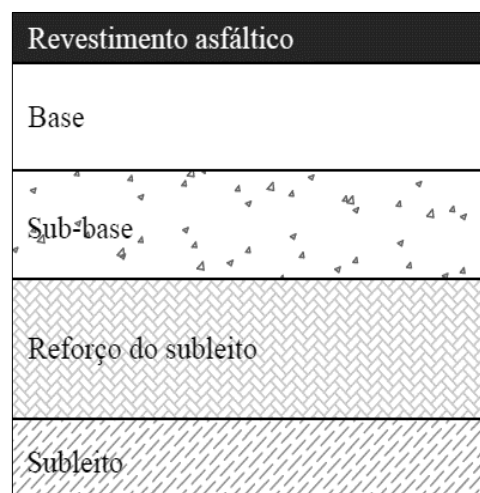
Segundo Sartori (2015), os materiais que formam o pavimento devem ter propriedades e características adequadas as solicitações e esforços a ele submetidos. Existem diversos tipos de pavimento, cada qual com características e especificidades para sua utilização. Sua classificação, de um modo geral, pode ser realizada em três principais classes: flexível, rígido e semirrígido.

A designação de pavimentos flexível é devida a todas as camadas deste tipo de pavimento sofrerem deformações elásticas significativas. A carga aplicada pela ação do tráfego se distribui de forma equivalente, originando um campo de tensões concentrado perto do ponto de aplicação da carga. Geralmente, este tipo de pavimento necessita de uma maior espessura em suas camadas, a fim de proteger o subleito do pavimento.

Conforme a Confederação Nacional de Trânsito (CNT, 2017), para realizar o dimensionamento de um pavimento flexível é necessário conhecer a capacidade de suporte dos materiais. Este cálculo deve ser realizado para cada material integrante nas camadas do pavimento e do seu subleito, com exceção do revestimento. A capacidade suporte dos materiais pode ser conhecida através do ISC ou comumente chamado de CBR, sendo utilizado no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigente no Brasil.

O pavimento flexível na maioria dos casos possui um revestimento betuminoso, seguido de camadas formadas por materiais granulares, ou materiais terrosos estabilizados e melhorados, sendo representado na Figura 1 (CNT, 2017).

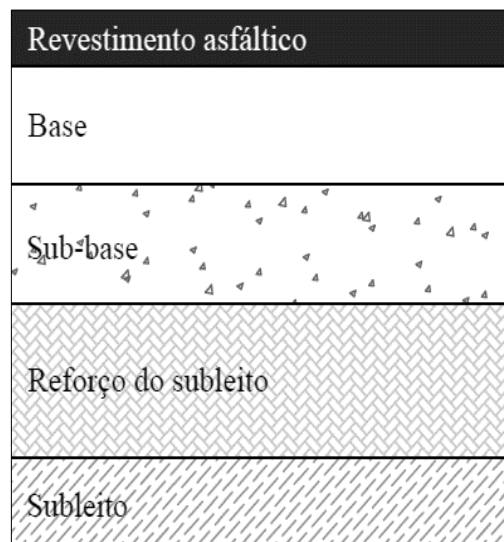
Figura 1- Estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Segundo o DNIT (2006), o pavimento rígido possui uma maior rigidez no seu revestimento do que nas camadas adjacentes, logo, seu revestimento absorve quase todas as tensões oriundas do tráfego. A distribuição das tensões ocorre em uma grande área, não de maneira pontual como é o caso do pavimento flexível. Nesse caso, o carregamento se distribui de maneira mais uniforme, o que ocasiona uma aplicação das tensões em menor intensidade na camada do subleito. Este pavimento possui uma baixa deformação, e, conforme representado na Figura 2, o material comumente utilizado no seu revestimento é o concreto de cimento Portland (CNT, 2017).

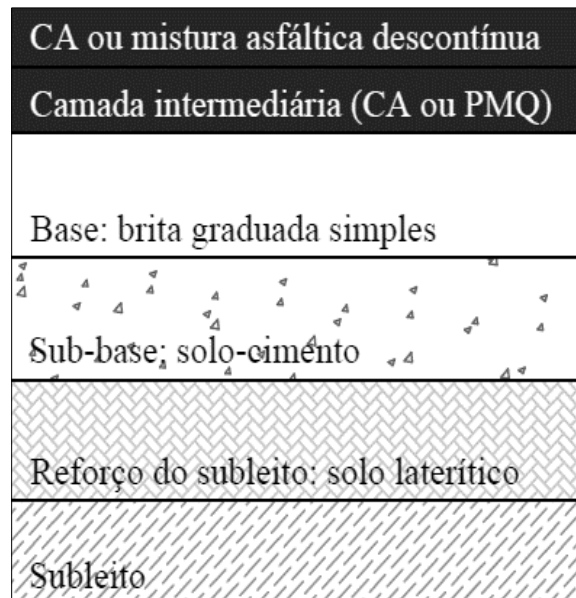
Figura 2- Estrutura de um pavimento rígido



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Bernucci et al. (2008) definem que pavimentos semirrígidos são: “Pavimentos de revestimento asfálticos que possuem em sua base ou sub-base materiais cimentados, sujeitos a solicitações de tração”. Segundo Sartori (2015), os pavimentos semirrígidos são uma relação entre pavimentos flexíveis e rígidos, cuja diferença se encontra na camada de base que resiste a boa parte desses esforços de tração. Estas diferenças se dão devido a adição de cal ou cimento nesta camada, o que ocasiona um aumento de rigidez e do módulo de elasticidade. Na Figura 3 está representado um corte de um pavimento semirrígido típico.

Figura 3- Pavimento semirrígido com sub-base de solo-cimento



Fonte: Bernucci et al. (2008).

3.3.2 Base e sub-base do pavimento

De acordo com o DNIT (2006), a camada de base do pavimento está situada acima da sub-base e abaixo do revestimento. A finalidade desta camada é a de resistir e distribuir os esforços verticais, sendo eles provenientes da ação do tráfego e do intemperismo. Os materiais empregados nesta camada devem respeitar algumas características, no que se refere a resistência e qualidade do material a ser aplicado. A qualidade dos materiais utilizados na base deve ser superior à dos materiais utilizados nas camadas subsequentes, pois a qualidade dos materiais está relacionada ao tamanho dos esforços a serem suportados pela camada (CNT, 2017). Segundo Balbo (2007) e CNT (2017), a base do pavimento pode ser constituída de diferentes materiais, bem como: solo estabilizado quimicamente, misturas de solo, agregados e brita graduada, entre outros materiais.

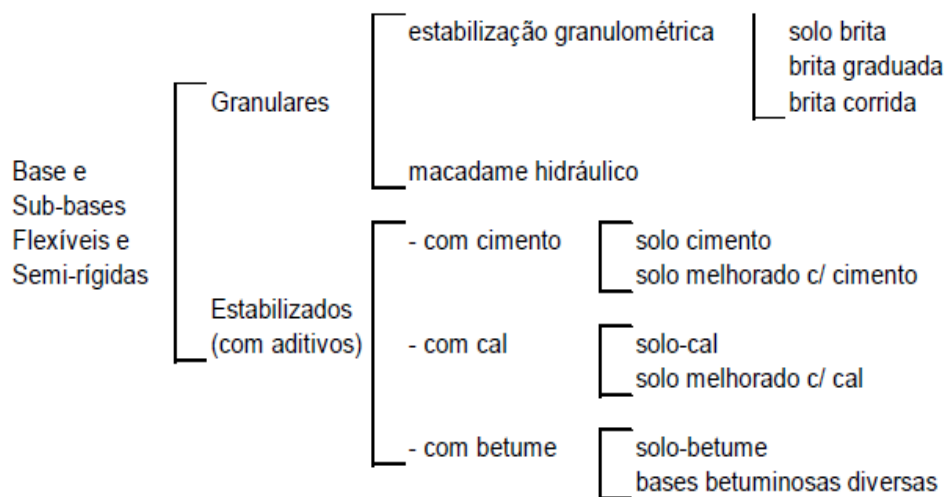
Esta camada em alguns casos pode formar o pavimento somente acrescida da camada de revestimento, entretanto em outros casos pode ser complementada com a camada de sub-base ou de reforço do subleito, com o intuito de auxiliar na distribuição das tensões atuantes. De acordo com Balbo (2007), muitas vezes os esforços que chegam à camada de base são muito grandes e para dissipação destes esforços seria necessária uma camada muito espessa, então

utiliza-se a divisão de camadas, criando-se a sub-base. A sub-base ocasiona uma redução da espessura e dos custos da camada da base.

A camada de sub-base tem finalidades técnicas e econômicas, auxiliando a camada de base a receber e distribuir os esforços atuantes (SARTORI, 2015). Geralmente, a qualidade e resistência dos materiais é inferior à dos utilizados na camada de base do pavimento. Alguns materiais que podem ser utilizados nesta camada são: solo estabilizado ou melhorado com cimento, misturas de solo e agregado, brita graduada, entre outros (CNT, 2017).

Conforme o Manual do DNIT (2006), a classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas pode ser feita conforme os materiais utilizados para sua composição representados na Figura 4.

Figura 4- Classificação das bases e sub-bases



Fonte: DNIT (2006).

3.2.5 Critérios de dimensionamento de pavimentos

A construção de pavimentos demanda uma grande quantidade de recursos naturais, a utilização de resíduos para sua execução pode ser uma alternativa viável do ponto de vista econômico e ambiental, reduzindo os gastos com destinação final de resíduos e possíveis contaminações. Entretanto para sua utilização é necessário a realização de ensaios e testes, de modo a verificar suas propriedades e permitir sua aplicação.

A realização de ensaios deve verificar algumas características que se enquadrem em norma como: resistência, impacto ambiental e viabilidade econômica. Alguns fatores que influenciam

diretamente nas propriedades obtidas são: dosagem de cinza a ser empregue na mistura, umidade usada na mistura e grau de compactação (energia que foi utilizada no processo de compactação). O processo de estabilização de cinzas altera principalmente as propriedades de expansão do solo, trabalhabilidade e plasticidade, quando comparado ao solo natural sem a adição de cinzas, (PEREIRA, 2012).

Conforme Brito e Graeff (2009), os métodos mais utilizados no Brasil para dimensionamento de pavimentos flexíveis são:

- Método do CBR (DNER): nesta metodologia os materiais utilizados para cada camada possuem coeficientes de equivalência estrutural. Onde a capacidade de suporte e resistência de cada camada e seu respectivo material constituinte são realizados pelo ensaio de CBR, deste modo o pavimento é dimensionado em função de um número (N) de operações em um eixo padrão.
- Método da resiliência: possui metodologia empírica, onde tem como base modelos de fadiga de misturas asfáltica para o comportamento de solos com granulometria fina e demais materiais granulares. Este método considera para fins de cálculo as tensões e deformações como elástico não linear. São realizados ensaios de caracterização de solo, granulometria com sedimentação e CBR. Sendo que a altura do pavimento é dimensionada de acordo com o valor de CBR e do parâmetro de tráfego N.
- Método do DNER/DNIT: dimensiona o pavimento de acordo com a sua vida útil (tempo) e ao número de solicitações de eixos que ele vai estar submetido (número de veículos que irá transitar). O dimensionamento ocorre através da análise da deformação, deflexão recuperável e desempenho do pavimento, analisando a fase de consolidação, fase elástica e fase de fadiga do pavimento.

O DNIT define alguns critérios mínimos de propriedades a serem atingidas para utilização de determinado material em cada camada de um pavimento. No manual do DNIT (2006), a exigência mínima que o órgão requer para o CBR é que seja maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual à 1% para aplicação do solo na camada de sub-base. Para camada de base, o CBR deve ser maior ou igual à 80% e expansão menor ou igual a 0,50%. Se referindo às demais camadas da estrutura, como o caso do subleito e o reforço do subleito, o DNIT exige CBR maior ou igual à 2% e expansão menor ou igual à 2% para aplicação no subleito e expansão menor ou igual à 1% para o reforço ao subleito.

4 ARTIGO: UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUO HOSPITALAR EM MISTURA COM SOLO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

4.1 RESUMO

Na engenharia de pavimentos um dos materiais mais utilizados na composição de suas camadas é o solo, entretanto em muitos casos, o solo disponível não possui propriedades adequadas. Com o propósito de utilizar o solo como base para o pavimento, pode-se realizar melhorias em suas propriedades através do processo de estabilização. Com base nisso, esse trabalho teve como objetivo avaliar as implicações decorrentes da substituição parcial de um solo natural, por cinzas oriundas de resíduos hospitalares, visando posteriormente a sua aplicação nas camadas de pavimentos flexíveis. Na presente pesquisa, o solo em análise foi estabilizado química e granulometricamente, através da substituição do solo natural por teores de 10, 15, e 20, % de cinza de resíduos hospitalares. O solo utilizado no estudo é constituído predominantemente de argila, material de granulometria fina (inferior a 02 mm). Do ponto de vista químico, os tratamentos não apresentaram potencial contaminante para o meio ambiente, podendo ser utilizado em camadas de pavimentos. No que se refere aos valores de Índice de Suporte Califórnia, constatou-se melhorias significativas na resistência do solo após o processo de estabilização, quando comparado ao solo natural. Nesse ensaio foi verificado que as misturas de solo com adição de 10 e 15 % possuem as maiores expansões, e o solo natural e solo natural+20% de cinza possuem as menores expansões. Entretanto, todos os tratamentos possuem expansão menor que o mínimo exigido em norma para utilização em camadas de pavimentos. Os valores de Índice de Suporte Califórnia, aumentaram significativamente o tratamento Solo Natural+20%, sendo este considerado como tratamento mais eficiente, podendo ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos e com expansão inferior a 1%. Deste modo, confirmou-se que o solo natural presente na região de Frederico Westphalen/RS pode ser aplicado diretamente na camada de sub-base de pavimentos flexíveis, desde que estabilizado química e granulometricamente com teores de substituição de 20% de cinza de resíduos hospitalares.

Palavras-chave: Estabilização de solos. Índice de Suporte Califórnia. Resíduos Perigosos.

4.2 ABSTRACT

In paving engineering, one of the most used materials in the composition of its layers is the soil, however, in many cases, the available soil does not have appropriate properties. With the purpose of using the soil as a base for the sidewalk, it is possible to improve its properties through the stabilization process. Based on this, this study aimed to evaluate the implications of the partial replacement of a natural soil by ashes from hospital waste, aiming at its subsequent application in the layers of flexible sidewalks. In the present research, the soil under analysis was stabilized chemically and granulometrically, through the substitution of the natural soil by levels of 10, 15, and 20, % of ash from hospital waste. The soil used in the study is composed predominantly of clay, material of fine granulometry (less than 02 mm). From the chemical point of view, the treatments did not present a contaminant potential for the environment, and can be used in sidewalk layers. With regard to the California Support Index values, significant improvements in soil strength were found after the stabilization process, when compared to natural soil. In this test it was found that the soil mixtures with 10 and 15% addition have the highest expansions, and the natural soil and natural soil + 20% ash have the lowest expansions.

However, all treatments have expansion less than the minimum required in the standard for use in sidewalk layers. The values of California Support Index, significantly increased the treatment Natural Soil + 20%, being considered as the most efficient treatment, which can be used in layers of sidewalk sub-base and with expansion less than 1%. Thus, it was confirmed that the natural soil present in the region of Frederico Westphalen/RS can be applied directly in the sub-base layer of flexible sidewalks, provided that stabilized chemically and granulometrically with replacement levels of 20% hospital waste ash.

Keywords: California Bearing Ratio, Soil Stabilization, Hazardous Waste.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, uma das grandes problemáticas da sociedade é o consumo deliberado de matérias primas e recursos naturais. Estes recursos são escassos e influenciam diretamente na quantidade de resíduos gerados pelo homem. Tavares (2004) pontua que o volume de resíduos gerados anualmente é crescente, tendo grande relação com a expansão das cidades e o desenvolvimento da indústria. A fim de controlar a poluição, reduzindo os danos ambientais e melhorando a saúde da população, que inevitavelmente entram em contato com os resíduos produzidos por residências, indústrias e serviços da saúde, faz-se necessário uma intervenção, com o intuito de gerenciar de maneira mais eficaz os resíduos gerados.

Os resíduos possuem diversas origens, sendo algumas delas: agricultura, indústria, doméstico, comercial, construções, hospitalares dentre outros. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) dispõe sobre a caracterização dos resíduos sólidos, sendo que é realizada de acordo com os processos pelos quais eles percorrem até chegar ao final da sua utilização. Para isso é necessário identificar a matéria prima, insumos e os processos aos quais os resíduos foram submetidos. Assim, conforme ABNT (2004), os resíduos sólidos podem ser classificados em dois grupos: Classe I perigosos e Classe II não perigosos (Inertes e não inertes).

Por meio do processo classificatório dos resíduos, distintas técnicas podem ser aplicadas a fim de gerenciar e fornecer uma disposição final adequada a estes materiais. Entretanto, os métodos mais utilizados para destinação de resíduos encontram-se sobrecarregadas, devido a sua excessiva produção, ocasionando sérios problemas ambientais. O meio ambiente é incapaz de absorver tanto material em um curto período, conseqüentemente este acaba passando por uma destinação inadequada, o que é altamente prejudicial a natureza afetando a vida atual e das próximas gerações (COSTA; FONSECA, 2009).

Para Russo (2003), uma alternativa que visa aprimorar e tornar mais eficaz a gestão dos resíduos é o uso conjunto de diversas técnicas, bem como: a reciclagem, redução, reutilização, compostagem, aterramento, incineração de resíduos e a adoção de programas de educação ambiental com participações comunitárias. De acordo com o mesmo autor, resíduos perigosos tal como os resíduos hospitalares, requerem alternativas de tratamentos mais seguras do que resíduos urbanos em geral. A incineração é uma das técnicas que podem ser adotadas para eliminar resíduos tóxicos e perigosos a saúde. Tendo como característica a redução de até 90% o volume dos resíduos. Durante o seu processo inicial de queima é produzido energia e no final, após a queima são originadas as cinzas que podem ser utilizadas em distintos contextos e possuindo variadas aplicações.

A pavimentação é caracterizada por obras de infraestrutura, e que para sua realização necessitam de matérias primas escassas e nem sempre encontradas in loco. O principal material constituinte das camadas utilizadas para construção de pavimentos é o solo, entretanto este nem sempre possui as propriedades necessárias para essa utilização, pois as propriedades e características dos solos são oriundas de seus processos de formação, mudando de local para local. Os solos são provenientes da decomposição das rochas, da ação do clima, do relevo e do tempo que esses fatores estão atuando sobre o material de origem, podendo possuir diferentes cores, texturas e propriedades. Algumas propriedades do solo são facilmente alteradas e outras não, por isso a necessidade de desenvolver técnicas para melhorar as características de um determinado solo.

Atualmente o modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil, onde os pavimentos servem tanto para o transporte de cargas com veículos pesados quanto como meio de transporte para os veículos de passeio, logo a demanda por solos e materiais utilizados na pavimentação torna-se ainda maior, pois um pavimento bem executado e preservado influencia diretamente no desempenho dos transportes e na economia do país. De acordo com Elias et al. (2017), com o intuito de utilizar técnicas mais sustentáveis e preservar os recursos naturais, têm se utilizado novas matérias primas em obras geotécnicas. Visando a redução dos custos e os impactos ambientais ocasionados na construção destas obras, Bernucci et al. (2008) enfatizam que os custos para execução de pavimentos são elevados e sendo possível utilizar o solo da região, há uma significativa redução desses custos, principalmente com o transporte.

A utilização de cinzas de resíduos hospitalares em camadas de pavimentos visa contribuir com a melhoria das propriedades dos solos. Permitindo sua posterior utilização em obras rodoviárias, contribuindo na redução dos volumes de resíduos gerados e dispostos na

natureza. A melhoria do solo só é possível devido as propriedades aglomerantes das cinzas, influenciando diretamente nas propriedades do solo e sua expansão. Além de contribuir diretamente com a destinação final de resíduos perigosos, pois ao misturar esse material com o solo natural e inseri-lo nas camadas de pavimentos, a possibilidade de contaminação pelo ar, chuvas ou contato direto com pessoas pode ser consideravelmente reduzida.

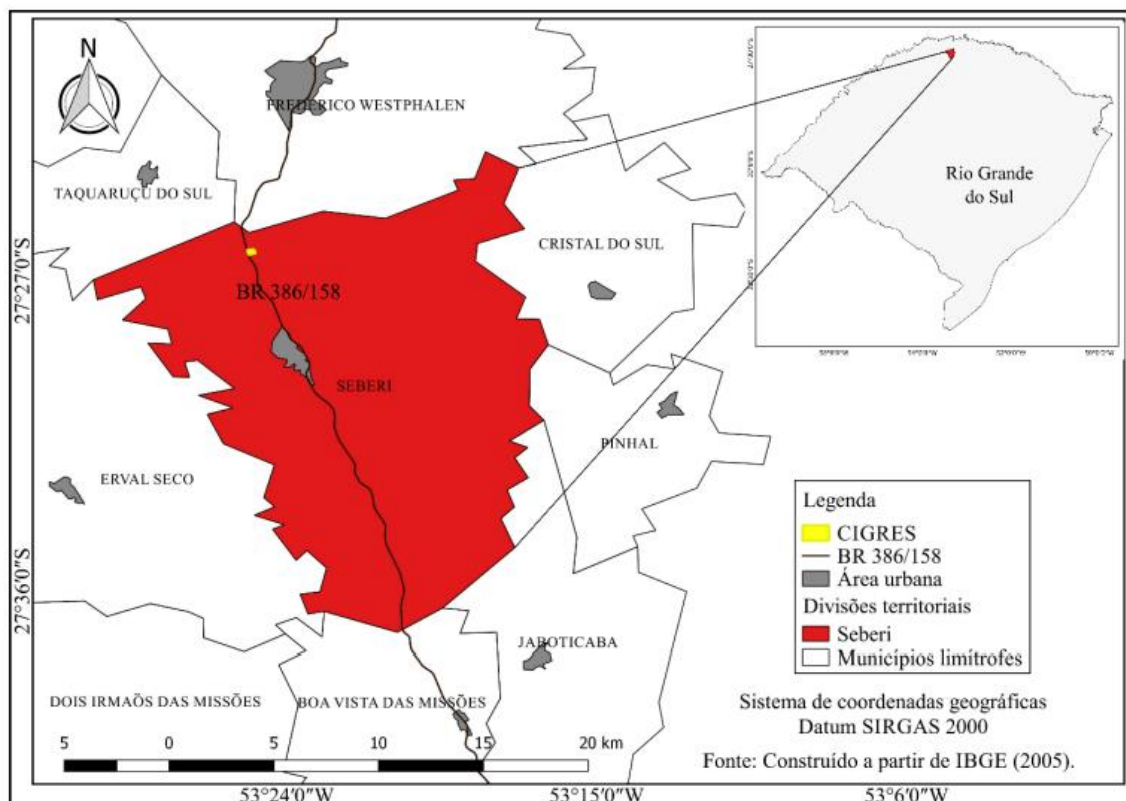
Com base neste contexto, esta pesquisa propõe avaliar os impactos decorrentes da substituição parcial de um solo natural, por cinzas oriundas de resíduos hospitalares, quanto a alteração de suas propriedades e seu comportamento mecânico, a fim de utilizá-lo posteriormente em camadas de pavimentos flexíveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local selecionado para coleta do solo está localizado no km 43 da BR-386, S/N, na linha Osvaldo Cruz, município de Seberi, RS. situado na região norte do estado, Na Figura 1 representada abaixo, está ilustrado o Mapa de localização do local da coleta dos solos.

Figura 1- Mapa de localização do município de Seberi



Fonte: Borba (2019).

O ponto da coleta dos solos a serem avaliados foi no CIGRES. Este local é destinado para gestão dos resíduos gerados pelos municípios conveniados, no local ocorre a separação de resíduos que podem vir a ser reciclados ou reutilizados, que possam de alguma maneira voltar ao mercado comercial. Além do processo de triagem de resíduos o consócio também possui uma área de terra que é utilizada como aterro sanitário de rejeitos e resíduos orgânicos. O solo encontrado neste local já vem sendo utilizado em pesquisas, como é o caso dos estudos realizados por Borba (2016; 2019) no qual foi classificado como Latossolo Vermelho, com alto teor de argila, acima de 85% em sua composição.

Realizou-se a coleta do solo no mês de julho de 2021. A Figura 2 ilustra o local de coleta do solo, após transportado até o laboratório de solos da UFSM-FW para avaliação do seu comportamento físico, químico e mecânico.

Figura 2- Ponto de extração e coleta de solo.



Fonte: Autor (2022).

Os ensaios foram realizados com o objetivo de verificar as propriedades do solo natural e o comportamento do solo estabilizado com diferentes teores de cinza, verificando quais as propriedades foram modificadas e melhoradas quando comparados ao solo natural. As cinzas

utilizadas na presente pesquisa (Figura 3) foram doadas pela empresa Ambientuus, com sede localizada no município de Cachoeirinha-RS.

A empresa é responsável por realizar a coleta de resíduos hospitalares em municípios de todo o estado, sendo um deles o município de Frederico Westphalen, local de realização da pesquisa. Após a coleta e transporte a Ambientuus também é responsável por o tratamento térmico dos resíduos, ou seja, pelo processo de incineração e depois destinação final, que é a disposição em aterro sanitário. Ao realizar a adição de cinzas no solo natural tem-se uma mistura estabilizada quimicamente, espera-se que o processo de estabilização viabilize a sua utilização em camadas de pavimentos flexíveis.

Figura 3- Cinza de resíduos hospitalares passantes na peneira #4,2mm

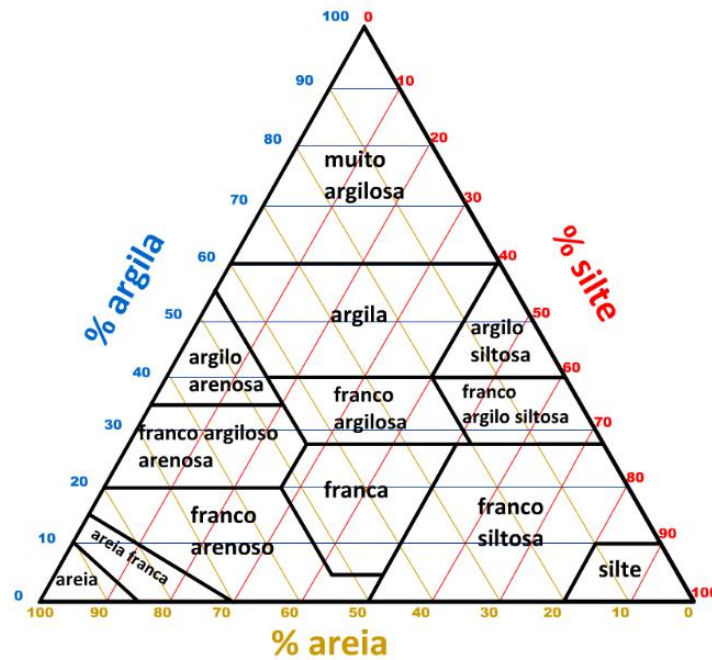


Fonte: Autor (2022).

2.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A fim de identificar a distribuição granulométrica do solo, realizou-se o ensaio de granulometria conforme metodologia prescrita na NBR 7181/2016 (ABNT, 2016). O ensaio de sedimentação foi realizado conforme o método de Vettori (1969), adaptado de EMBRAPA (1997). A classificação do tipo de solo de acordo com o percentual de cada fração de silte, argila e areia presente no solo e misturas analisadas, para identificação de cada tipo foi utilizado um Gerador de Triângulo Textural conforme representado na Figura 4.

Figura 4- Gerador de triângulo textural



Fonte: Quoos et al. (2011).

Para identificação dos limites de liquidez e plasticidade do solo e misturas, foi realizado os ensaios de Limites de Atterberg, conforme prescrito nas normas brasileiras NBR 6.457/2016 (ABNT, 2016), NBR 6.459/1984 (ABNT, 1984) e NBR 7.180/1984 (ABNT, 1984), respectivamente. Com base nos resultados obtidos nestes ensaios, além de se obter a classificação pelo triângulo textural, efetuou-se a classificação pelos sistemas tradicionais, sendo eles o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o Sistema Transportation Research Board (TRB).

Os ensaios de análise química do solo foram realizados de acordo com as metodologias de Tedesco et al. (1995) e Mehlich (1984). Após as análises de caracterização básica do solo e misturas foram realizados os ensaios de análise mecânica. O ensaio de compactação foi realizado para obtenção do peso específico aparente seco máximo do solo e teor ótimo de umidade. A metodologia utilizada seguiu conforme normativa da NBR 7182/2016 (ABNT, 2016), os ensaios foram realizados com reuso de material na energia Proctor Normal. Como o solo analisado é 100% passante na peneira 4,8 mm foi conduzido o ensaio com o soquete e cilindro pequeno, com 3 camadas e 26 golpes por camada.

Com os resultados obtidos no ensaio de compactação, realizou-se o ensaio de CBR, a fim de se obter o ISC, sendo este um dos principais parâmetros para o dimensionamento de pavimentos no Brasil. O ensaio de ISC é realizado a partir das curvas de compactação, para

realização deste ensaio ocorreu a preparação do solo *in natura* e misturas de solo/cinza. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM campus de Santa Maria - RS.

O CBR foi moldado e ensaiado de acordo com os resultados obtidos no ensaio de compactação, no teor de umidade ótima e densidade máxima de sua respectiva mistura. Este ensaio tem o intuito de identificar a expansibilidade e resistência dos tratamentos, a energia de compactação utilizada foi Proctor Normal, seguindo todas as etapas conforme a norma NBR 9.895/2017 (ABNT, 2017).

Por meio do ensaio de CBR ou ISC, é possível verificar a aplicabilidade ou não das misturas em camadas de pavimentos flexíveis. Por meio deste ensaio pode-se identificar se o processo de adição de cinzas contribuiu ou não para melhoria das propriedades do solo, alterando as propriedades de expansão e resistência do mesmo.

Os resultados obtidos nos ensaios foram submetidos à análise de variância, o delineamento estatístico utilizado foi o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), onde foram realizados quatro tratamentos (Quadro 1) e cinco repetições de ensaios para cada tratamento, resultando em um esquema fatorial 4x5 totalizando 20 unidades experimentais. Analisou-se estatisticamente as variáveis físicas, químicas e mecânicas de todos os tratamentos da pesquisa, por meio de comparações das médias, para amostras independentes a 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

As análises estatísticas foram realizadas a fim de verificar se há diferença significativa entre os tratamentos, qual o tratamento mais eficiente e também se houve ou não diferença entre os tratamentos aplicados. As análises foram analisadas pelo teste de Tukey, a fim de comparar as médias dos resultados, também foi realizada a análise de variância (ANOVA). O processo de análise de dados foi realizado com o auxílio dos programas *Microsoft Office Excel e BiosEstat 5.0* (AYRES et al., 2007).

Quadro 1- Nomenclatura dos tratamentos realizados.

| TRATAMENTO | SIGLA |
|--|--------|
| Solo Natural | SN |
| Solo Natural substituído por 10% de Cinza de Resíduos Hospitalares | SN+10% |
| Solo Natural substituído por 15% de Cinza de Resíduos Hospitalares | SN+15% |
| Solo Natural substituído por 20% de Cinza de Resíduos Hospitalares | SN+20% |

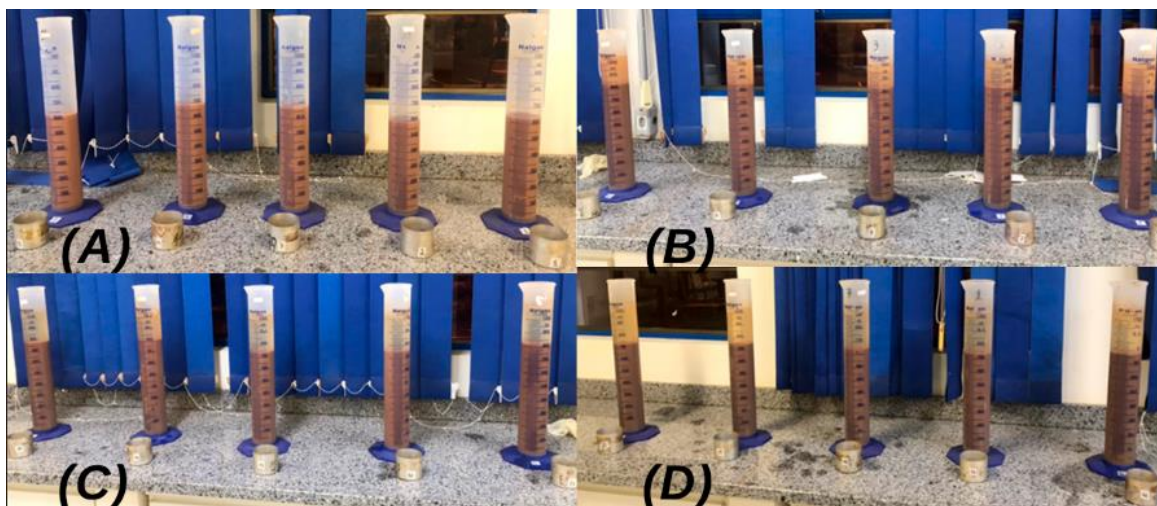
Fonte: Autor (2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão descritos os resultados obtidos após os ensaios laboratoriais de classificação e caracterização, de modo a analisar o comportamento químico, físico e mecânico do solo natural e misturas de solo/cinza de RH. Sendo realizado a separação dos resultados conforme o tipo de ensaio aplicado a cada tratamento. A apresentação dos resultados se dá por meio da média aritmética das cinco repetições realizadas em cada ensaio, conforme o delineamento estatístico. Logo, todos os resultados apresentados em figuras e tabelas referem-se a média das cinco repetições realizadas em cada ensaio.

Durante o ensaio de sedimentação do solo e misturas, observou-se comportamentos distintos, entre os tratamentos. Conforme representado na Figura 5, identifica-se que após os 90 minutos de decantação, o solo natural apresentou características de solos argilosos com pouca sedimentação e areia em sua composição. Entretanto, foi observado que no mesmo período de sedimentação as misturas de solo/cinza apresentaram disparidade de características, quando comparado ao solo natural.

Figura 5- Ensaio de Sedimentação dos tratamentos SN (A), SN+10% (B), SN+15% (C) e SN+20% (D)



Fonte: Autor (2022).

Durante o ensaio de sedimentação a argila presente no solo sedimentou junto com a fração de silte, quanto maior o teor de adição de cinzas no solo natural, maior foi a sedimentação da argila em conjunto com a areia, alterando completamente a classificação do solo. Deste modo não foi possível identificar a fração de argila presente, sendo que o solo natural possui predominantemente fração argilosa.

Destaca-se a grande alteração das propriedades granulométricas do solo, que após adição de cinzas de resíduos hospitalares transformaram um solo argiloso para um solo siltoso. Esta alteração de propriedades ocorreu apenas nas misturas com adições de cinza, pois para o solo natural toda a fração de argila ficou em suspensão, de acordo com a característica típica de solos argilosos.

Todas as misturas e solo *in natura* não possuem fração de pedregulho, ficando retido apenas nas malhas finas e médias. A fração de argila foi obtida através da leitura do densímetro, e devido as alterações ocasionadas pela adição de cinza, apenas o solo natural teve fração de argila presente. Na Tabela 1 está descrito as porcentagens encontradas em cada mistura de areia, silte e argila, sendo também representados nesta tabela os valores obtidos nas análises estatísticas. A pirâmide textural de cada tratamento foi gerada utilizando os resultados dos valores passantes e retidos em cada peneira, sendo realizado o peneiramento fino, médio e grosso do solo natural e misturas de solo/cinza. Para gerar as pirâmides ilustradas nas Figura 6 foi utilizado o site criado por Quoss et al. (2011), as pirâmides foram confeccionadas utilizando os valores obtidos na Tabela 1.

Tabela 1-Valores médios da fração areia, silte e argila de um Latossolo Vermelho sem adição de cinza e com adição de cinzas de resíduos hospitalares

| Identificação | Areia | Silte | Argila |
|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | % | |
| SN | 5,64 ^a | 51,78 ^a | 42,59 ^a |
| SN+10% | 11,08 ^b | 88,92 ^b | 0 ^b |
| SN+15% | 12,83 ^c | 87,17 ^b | 0 ^b |
| SN+20% | 16,33 ^d | 83,67 ^c | 0 ^b |
| CV | Precisão alta CV < 10% | Precisão alta CV < 10% | Precisão alta CV < 10% |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

De acordo com a análise granulométrica, o solo encontra-se na faixa de solos argilosos e siltosos, que são solos finos. Conforme Oliveira e Brito (1998), latossolos possuem um perfil com pouca diferença de granulometria entre os horizontes do solo. Entretanto, este tipo de solo apresenta um alto grau de floculação. Como este solo foi coletado no horizonte B, esse horizonte apresenta alto grau de intemperização, não apresentando fragmentos rochosos. Para melhor identificação dos valores e porcentagens de cada fração foi realizado o ensaio de granulometria com a adição de dispersante.

A média dos tratamentos SN+10% e SN+15% não diferem entre si em nível de 5% de significância para o teor de silte analisado. Enquanto, para o teor de argila as médias dos tratamentos SN+10%, SN+15% e SN+20% também não diferem entre si. Entretanto todas as médias dos tratamentos com substituição de cinzas diferem quando comparadas com o solo natural. Durante o ensaio de sedimentação observou-se um comportamento atípico, onde toda a argila presente nas misturas de solo natural+ cinza de resíduos hospitalares flocularam junto com as cinzas, se misturando na fração silte e areia do solo.

Por meio da realização dos ensaios de Limites de Atterberg pode-se identificar os Limites de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade do solo (LP), de modo a determinar os limites de consistência do solo e misturas. Os valores de LL são referentes ao teor de umidade médio nos 25 golpes. Para obtenção do Índice de Plasticidade (IP) do solo, realizou-se a subtração entre o limite de liquidez e o de plasticidade. Na Tabela 2 estão representados os valores de LL, LP e IP para o solo natural e misturas, com cinza nos teores de 10%, 15% e 20% respectivamente, sendo também ilustrados os valores da análise estatística do respectivo ensaio.

Todos os tratamentos apresentaram valores similares de LL, LP e IP, deste modo pode-se dizer que os tratamentos não diferem entre si em nível de 5% de significância. Ou seja, podemos dizer que apesar de o solo natural ser substituído por cinzas, seu comportamento plástico não foi alterado.

Tabela 2-Valores médios de limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade do solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares

| Identificação | LL (%) | LP (%) | IP |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| SN | 52,20 ^a | 38,70 ^a | 13,62 ^a |
| SN+10% | 51,04 ^a | 38,93 ^a | 12,11 ^a |
| SN+15% | 53 ^a | 37,89 ^a | 15,11 ^a |
| SN+20% | 49,28 ^a | 38,91 ^a | 13,45 ^a |
| CV | Precisão baixa CV > 20% | Precisão muito baixa CV 30% | Precisão média CV < 20% |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

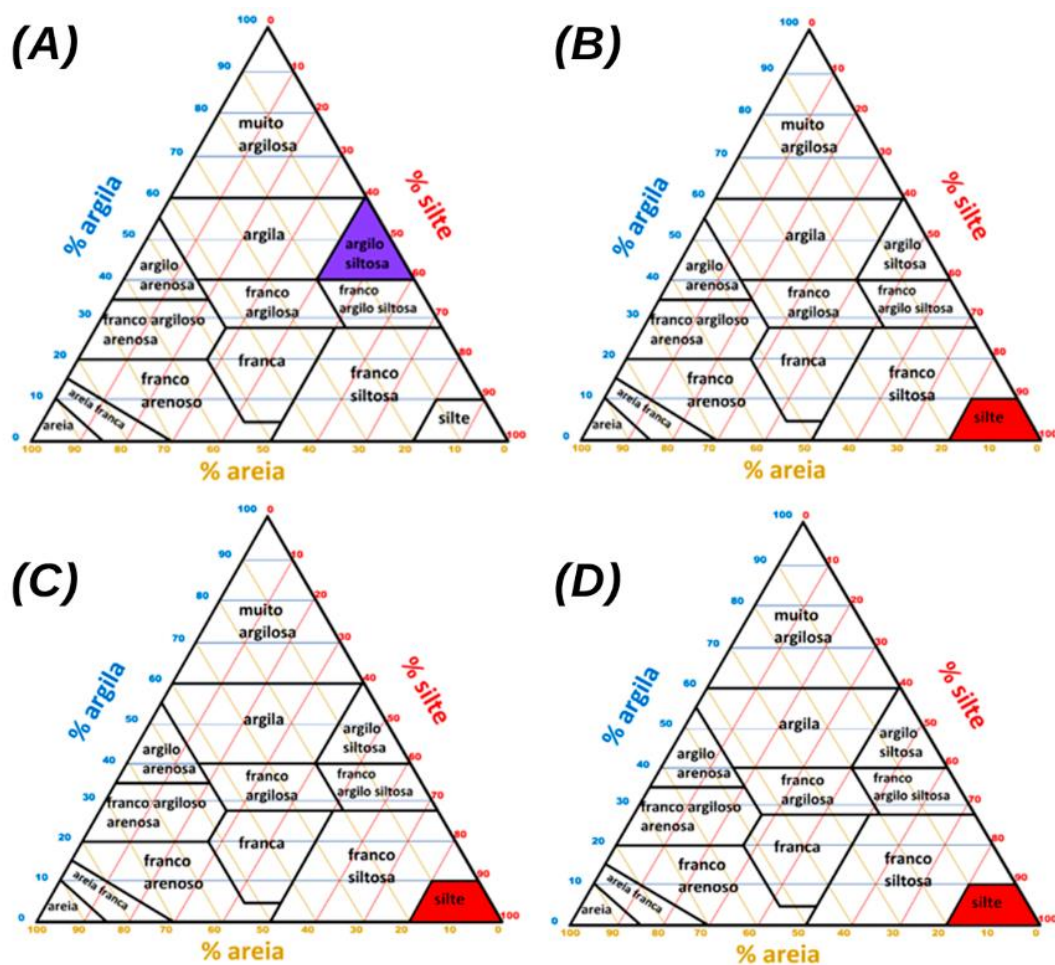
Fonte: Autor (2022).

De acordo com os valores encontrados de IP, todos ficaram na faixa de 11-15, sendo considerado de plasticidade média. Para Malanconi (2013) a plasticidade de um solo está relacionada com o limite de liquidez, quando um solo possui limite de liquidez superior a 50% o mesmo é caracterizado como de alta plasticidade e quando inferior a 50% é classificado de baixo teor de plasticidade. Bastos et al. (2008) em análises realizadas no estado do Rio Grande

do Sul, encontraram valores de LL, LP e IP de 32%, 16% e 16% respectivamente, e um teor de argila de 26%.

Conforme análises de consistência realizadas por Borba (2016) em solo laterítico de aterro sanitário, os valores médios de LP ficaram entre 35 e 41%, características de solos com alto teores de argila. A fração de argila e silte de um solo estão relacionadas aos limites de consistência de um solo, logo pode-se dizer que quanto maior for a plasticidade do solo, maior será o teor de umidade necessário para que o solo atinja o estado plástico, o teor de areia de um solo não é plástico, deste modo quanto menor o valor de LP menor é a plasticidade do solo e menor será o valor de LL (RIBEIRO; SOUZA, 2018). Os resultados encontrados na presente análise e com base nos valores encontrados comumente na literatura, considera-se o solo e misturas em questão de media a alta plasticidade e liquidez, característica esta de solo com predominância siltosa e argilosa, conforme confirmado na análise granulométrica.

Figura 6- Pirâmide textural dos tratamentos SN (A), SN+10% (B), SN+15% (C) e SN+20% (D)



Fonte: Autor (2022).

Utilizando os resultados de granulometria e Limites de Atterberg, realizou-se a classificação do solo. De acordo com o método TRB, o solo e cinzas se enquadram na classificação A-7-5, argila de alta plasticidade e compressibilidade. A classificação do solo natural e cinzas de acordo com o SUCS, é de um solo MH, siltoso de média plasticidade e alta compressibilidade.

Para melhor caracterização do solo natural e solo/cinza, foi realizado o ensaio de análise química, a fim de verificar se havia presença de algum potencial contaminante no solo e misturas e, a fim de verificar a Capacidade de Troca Catiônica (CTC), o Potencial Hidrogeniônico (pH) e presença de Matéria Orgânica (MO). Os resultados encontrados na análise química estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3- Valores médios das propriedades químicas do solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares.

| PROPRIEDADES | | AMOSTRA | | | |
|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | SN | S10 | S15 | S20 |
| pH água | | 6,54 ^a | 7,96 ^b | 7,98 ^{bc} | 8,29 ^c |
| M. O. | % | 1,39 ^a | 1,44 ^a | 1,31 ^a | 1,32 ^a |
| CTC pH 7,0 | | 7,23 ^a | 18,30 ^b | 20,80 ^c | 21,40 ^c |
| SMP | | 6,70 | 7,90 | 8 | 8,35 |
| P | | 4,24 | 22,45 | 23,40 | 21,60 |
| K | | 66,96 | 700,80 | 806,40 | 782,40 |
| Cu | | 10,20 | 4,52 | 3,70 | 3,56 |
| Zn | mg/dm ³ | 6,68 | 81,43 | 81,40 | 69,51 |
| Ca | | 3,68 | 15,19 | 17,60 | 18,51 |
| Mg | | 1,42 | 0,83 | 0,70 | 0,59 |
| Al | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Al+H | | 1,95 | 0,49 | 0,44 | 0,29 |
| CTC efetiva | cmolc/dm ³ | 5,28 | 17,81 | 20,36 | 21,10 |
| CV propriedades | | Precisão Alta CV < 10% | | | |

*Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

A pesquisa realizada confirma que a não há nenhum teor de metais pesados e possíveis contaminantes no solo (Tabela 3). O solo não apresentou alumínio trocável, ou seja, tanto para o solo natural, quanto misturas não há toxicidade presente. O teor de MO foi de 1,40%,

característica de solo com pouca presença de matéria orgânica. O pH do solo natural é considerado como ácido, já as misturas de solo cinzam alteraram esta característica do solo natural, transformando seu pH em alcalino.

Solos com valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) entre 11 e 50 cmolc/dm^3 , possuem elevado teor de argila, elevado valor de pH, maior capacidade de reter nutrientes e alta retenção de água. Entretanto, solos com valores de CTC, entre 1 e 10 cmolc/dm^3 , possuem alto teor de areia, menor valor de pH, baixa capacidade de retenção de água e maior predisposição para lixiviação de nitrogênio e potássio (INSTITUTO DA POTASSA; FOSFATO, 1998). O relatório publicado por EMBRAPA (2018) revela que valores de CTC acima 27 cmolc/dm^3 , são consideradas argilas de alta reatividade, já para valores de CTC inferiores à 27 cmolc/dm^3 , são consideradas de baixa reatividade. Para todos os tratamentos realizados considera-se como um solo de baixa reatividade, pois os valores de CTC ficaram abaixo de 27 cmolc/dm^3 .

De acordo com Mello et al. (1983), para valores de CTC entre 5-15 cmolc/dm^3 , conforme os encontrados na presente pesquisa, há presença respectivamente de caulinita e illita, estes argilominerais possuem tendência de ter média expansibilidade. Conforme valores analisados por Santos (2016), argilas de baixa atividade possuem CTC inferior à 6 cmolc/dm^3 , outra característica desse tipo de solo é o baixo teor de MO $\leq 1\%$. Conforme ilustrado na Tabela 3, os valores de CTC e MO foram semelhantes aos encontrados por Santos (2016). Ainda de acordo com o mesmo autor solos com CTC entre 3 e 15 cmolc/dm^3 pontuam a presença de caulinita, que fornece ao solo característica de baixa expansibilidade. No solo do CIGRES, ocorre a presença do argilomineral caulinita 1:1 não expansiva (BORBA, 2016).

Para Ker (1997), os latossolos são oriundos de distintos processos de intemperismo, possuindo mineralogia simples, com presença de silte e areia. Alguns argilominerais presentes neste tipo de solo são a magnetita, ilmenita e quartzo, originados a partir de rochas básicas como o caso do basalto, que possui grande predominância em nosso país. Outra característica desse tipo de solo é a presença Caulinita, illita e hematita presentes na fração argila de latossolos.

Os principais parâmetros a serem considerados da análise química que são: MO, pH e CTC. Para os valores de pH podemos dizer que as médias do tratamento SN+10% e SN+15% não diferem entre si, o mesmo ocorre as médias do tratamento SN+15% e SN+20%. Para os valores médios de MO, os únicos tratamentos que diferem em nível de 5% de significância são SN+10% e SN+15%. A CTC em pH7 não possui diferença significativa entre os tratamentos SN+15% e SN+20%, entretanto para as demais comparações as médias diferem entre si,

evidenciando que as diferentes porcentagens de substituição de cinzas proporcionam distintas alterações das propriedades.

Após verificar as propriedades físicas e químicas, realizou-se a verificação das propriedades mecânicas do solo/cinza, por meio do ensaio de compactação. Este ensaio foi realizado utilizando a energia Proctor Normal para todos os tratamentos. Na Figura 7 estão representadas as curvas de compactação, cada curva representa a média de cada ponto referente as cinco repetições realizadas. As repetições foram efetuadas tanto para os tratamentos de solo natural quanto para as misturas de solo cinza. Destaca-se, que o solo natural foi substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares, nos teores já citados anteriormente. Nesse mesmo solo, Roessler et al. (2022) encontraram umidade ótima de 34%, densidade máxima de 1.395 kg/m³, condutividade hidráulica saturada de 2,1 x 10⁻⁶ cm.s⁻¹.

Na Tabela 4 estão sintetizados os valores de teor ótimo de umidade e peso específico aparente seco máximo (kg/m³) obtidos no ensaio de compactação. Em análise estatística realizada, constatou-se que não há diferença significativa do peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo de todos os tratamentos, logo pode-se dizer que os tratamentos não diferem entre si, no que se refere ao peso e teor de umidade dos tratamentos.

Tabela 4- Valores médios de teor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares

| Amostra | Energia de compactação | Peso específico aparente seco máximo (kg/m³) | Umidade ótima (%) |
|----------------|-------------------------------|--|--------------------------|
| SN | Normal | 1385 ^a | 35,70 ^a |
| SN+10% | Normal | 1370 ^a | 32,20 ^a |
| SN+15% | Normal | 1338 ^a | 36,20 ^a |
| SN+20% | Normal | 1342 ^a | 34,80 ^a |
| CV | | Precisão Alta CV < 10% | Precisão Alta CV < 10% |

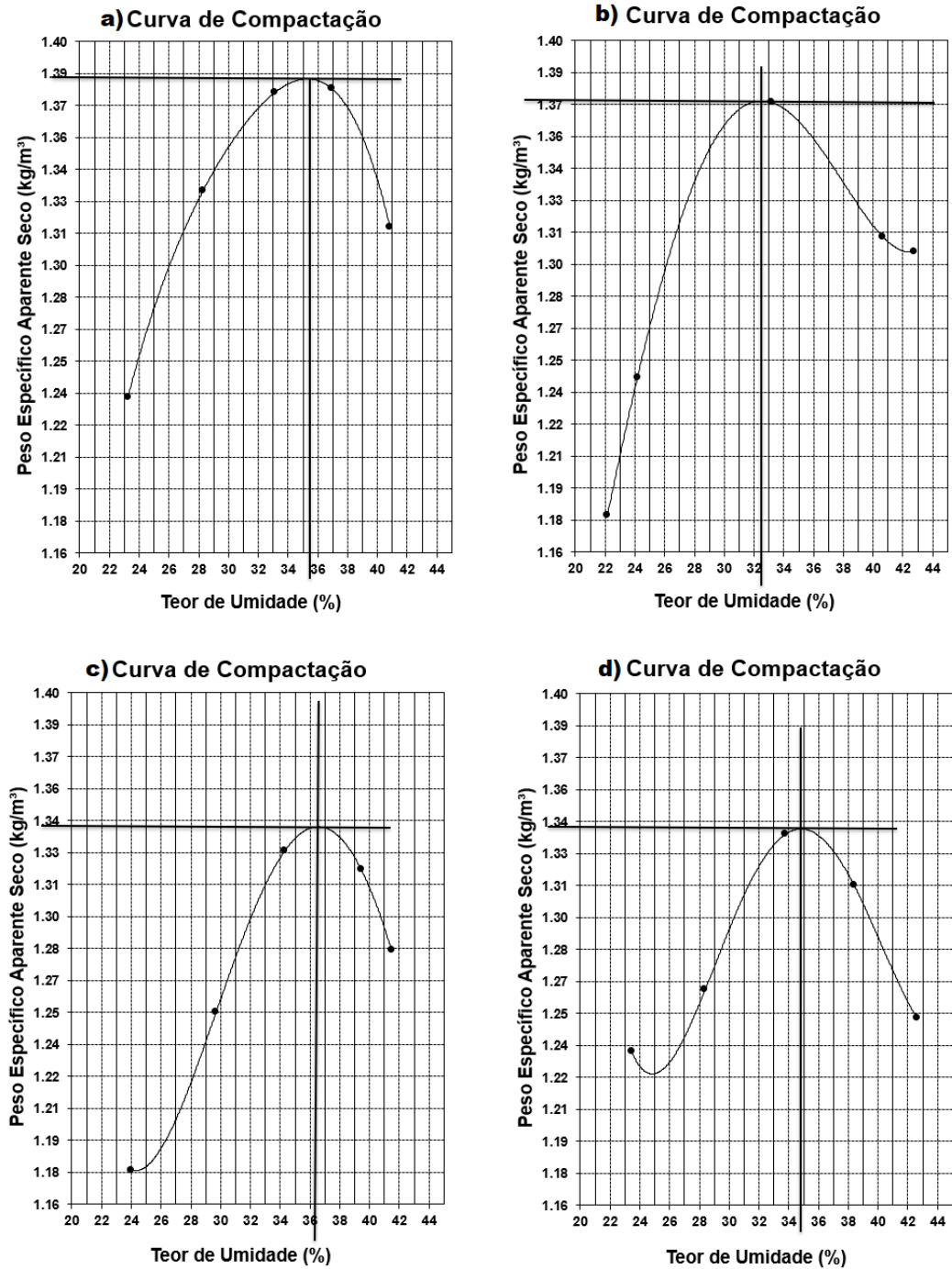
*Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

Conforme os resultados obtidos, identificou-se que o peso específico aparente seco máximo para todos os tratamentos teve a mesma curva de tendência, o que é confirmado na análise estatística realizada. Observou-se também que o peso específico e a umidade ótima de todos os tratamentos se mantiveram similar, não diferindo entre si do ponto de vista estatístico. Os teores de umidade obtidos variaram na faixa entre 32 - 36% de umidade. O Peso específico aparente seco máximo ficou na faixa de 1338 -1385 kg/m³. No ensaio de compactação de solos

argilosos identifica-se que o teor de umidade é mais elevado, consequentemente a massa específica é menor quando comparados com solos arenosos.

Figura 7- Curva dos valores médios de compactação para os tratamentos SN (A), SN+10% (B), SN+15% (C) e SN+20% (D)



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que para um mesmo solo, independentemente da energia de compactação, a curva de compactação tende a manter a mesma forma. Destaca-se ainda que solos lateríticos tendem a apresentar um melhor comportamento para aplicação em camadas de pavimentos, devido a sua capacidade de suporte (ALMEIDA, 2017).

Os valores encontrados para Santos (2016) para o tratamento de solo da jazida de Coronel Barros (solo CB) foram de peso específico aparente seco máximo variou entre 1467 e 1475 kg/m³ e o teor de umidade ótima na faixa de 28,7% de média, sendo valores próximos aos encontrados no presente trabalho, onde o valor de peso específico seco máximo variou de 1385 à 1338 kg/m³ (média) e teor de umidade entre 32,20% à 36,20% (média).

Na Tabela 5 estão descritos os resultados encontrados no ensaio de ISC. Para este ensaio foram realizadas quatro repetições de cada tratamento, devido ao mesmo ser realizado em prensa e compactador mecânicos, a precisão do ensaio é mais exata, com menor interferência humana. Nesta tabela também estão apresentados os valores estatísticos obtidos para a massa específica aparente seca, ISC e expansão para todos os tratamentos.

Tabela 5- Valores médios de expansão, massa específica aparente seca e Índice de Suporte Califórnia para os tratamentos de solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares

| Identificação | Massa específica aparente seca (kg/m ³) | ISC (%) | Expansão (%) |
|---------------|---|---------------------------|----------------------------|
| SN | 1435,90 ^a | 9,98 ^a | 0,24 ^a |
| SN+10% | 1370,85 ^a | 13,75 ^{ab} | 0,75 ^a |
| SN+15% | 1363,17 ^a | 13 ^{ab} | 0,89 ^a |
| SN+20% | 1346,55 ^a | 20,37 ^c | 0,71 ^a |
| CV | Precisão Alta CV < 10% | Precisão Alta CV < 10% | Precisão Baixa CV > 20% |

* Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

Observa-se que os valores de ISC e possuem diferença significativa em nível de 5% apenas entre os seguintes tratamentos: SN e SN+20%; SN+10% e SN+20%; SN+15% e SN+20%. Entretanto, quando analisados os valores de expansão para os tratamentos, nenhum possui diferença significativa. Conforme os resultados obtidos identificaram-se que as misturas de solo cinzadas apresentaram capacidade de suporte maior que a do solo natural, sendo que a maior capacidade foi a do tratamento SN+20%, com ISC de 20,37%. Para aplicação na camada de sub-base de pavimentos flexíveis o valor de CBR deve ser igual ou superior a 20% e para a camada de base, o CBR deve ser igual ou superior à 80%. Neste caso apenas a mistura de

SN+20% respeitou o critério de $CBR \geq 20\%$, podendo ser empregue na camada de sub-base de pavimentos.

Quando comparado os valores de ISC e expansão com a literatura, para latossolos podemos identificar semelhança com demais resultados encontrados por outros autores como o caso de Santos (2016) que alcançou ISC de 10,6% e expansão de 0,20%. Almeida (2017) chegou a valores de ISC de 12 % para energia de compactação normal e 23% na intermediária. Ainda de acordo com o mesmo autor os valores de expansão tanto para energia normal quanto para energia intermediária o valor da expansão se manteve a mesma, com 0,07% de expansão, sendo considerado como um solo de baixa expansibilidade.

Ao comparar os valores encontrados com a pesquisa realizada por Passos et al (2018), podemos identificar valores similares de ISC e expansão para um solo argiloso estabilizado 10% de areia, ficando com expansão abaixo de 0,1% e ISC de 21%. Este fator ressalta o comportamento similar apresentados por solos argilosos.

No que se refere ao critério de expansão, de acordo com norma os valores mínimos de para aplicação na camada de pavimentos são de 0,5% para aplicação na camada de base e de 1% para camada de sub-base, logo constata-se que todos os tratamentos possuem expansão inferior a 1% e podem ser aplicados na camada de sub-base, entretanto no critério expansão, apenas o solo natural pode ser aplicado na camada de base, pois o mesmo possui expansão inferior a 0,5% conforme o máximo prescrito em norma.

Se referindo às demais camadas da estrutura, como o caso do subleito e o reforço do subleito, o DNIT exige CBR maior ou igual à 2% e expansão menor ou igual à 2% para aplicação no subleito e expansão menor ou igual à 1% para o reforço ao subleito. Observa-se que todos os tratamentos respeitam ambos os critérios e expansão e resistência, podendo ser utilizados nas camadas de reforço ao subleito e subleito.

4. CONCLUSÕES

- A adição de cinza de resíduos hospitalares modificou a granulometria e características do solo natural, alterando suas propriedades granulométricas, e minerais como pH, Zn, Ca, Cu.
- O processo de estabilização não alterou significativamente os valores de limite de liquidez e plasticidade das misturas, quando comparadas aos valores iniciais encontrados no solo natural.

- O tratamento mais eficiente melhora das propriedades de resistência do solo, de acordo com a análise estatística foi o SN+20%, onde a variância entre os resultados foi em nível de 5%, com coeficiente de variação de alta precisão.
- Ao analisar quimicamente as misturas e cinza verificou-se que não há presença de nenhum contaminante que possa vir a causar contaminação do lençol freático, valores como Al são nulos tanto para o solo natural, quanto para as misturas de solo/cinza, e demais minerais possuem em sua totalidade valores abaixo de possíveis contaminações.
- Na compactação de solos identificou-se que a densidade máxima e os teores ótimos de umidade permaneceram similares, esta diferença não é significativa do ponto de vista estatístico.
- No ensaio de CBR verificou-se que as misturas de solo com adição de 15 e 10% possuem as maiores expansões, e o solo natural e SN+20% de cinza possuem as menores expansões. Entretanto, todos os tratamentos possuem expansão menor que o mínimo exigido em norma para utilização em camadas de pavimentos.
- Os valores de ISC aumentarem de acordo com a maior percentual de adição de cinza, sendo que o tratamento de SN+20% pode ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos.
- O solo natural já possui as características necessárias de expansão de resistência para serem empregues nas camadas de reforço ao subleito e subleito e a adição de cinzas de resíduo hospitalar não alterou essa capacidade de expansão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10.004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 13p.c

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 14p.

ALMEIDA, Felipe Maraschine de. **Energias para compactação de solos destinados a estruturas de pavimentos asfálticos**. 2017. 101 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

AYRES, Manuel et al. **BioEstat: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas**. 5. ed. Belém: Ong Mamiraua, 2007. 364p.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert; SCHMITT, Leonardo Andres; VASCONCELOS, Silvana Machado de; RABASSA, Camila Mendonça; SOUZA, Ezequiel Wustrow. Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. **Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)**, Rio Grande, v. 12, p. 59-67, 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. ABEDA: Rio de Janeiro, 2008.

BORBA, Willian Fernando de. **Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea em área ocupada por aterro sanitário em Seberi-RS**. 2016. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BORBA, Willian Fernando. **Avaliação da contaminação ambiental em um aterro sanitário de pequeno porte, sem utilização de geomembrana, na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

COSTA, Wesley Moreira da; FONSECA, Maria Christina Grimaldi da. A importância do gerenciamento dos resíduos hospitalares e seus aspectos positivos para o meio ambiente. **Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. 5, n. 9, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. 356p.

ELIAS, Deyvid de Souza; SOARES, Anderson Borghetti; SOUZA, Henrique Petisco de. Aproveitamento De Resíduos Sólidos–Estudo Experimental De Misturas De Solo E Cinza Volante De Carvão Mineral. *In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL. Anais [...]*. Criciúma, Santa Catarina. 2017.

INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. Manual internacional de fertilidade do solo/tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2ed. rev. e ampl. Piracicaba. **Potafos**. 1998. 177P.

KER, João Carlos. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, V.5, n1, P. 17 - 40, 1997.

MALANCONI, Maurício. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano**. 2013. Dissertação (Mestrado)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. 2013.

MEHLICH, Adolph. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 9, n. 6, p. 477-492, 1978.

MELLO, Francisco de Assis Ferraz de al. **Fertilidade do solo**. Nobel. São Paulo. 400p. 1985.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PASSOS, Bruno Conde et al. Análise do CBR de sub-base argilosa estabilizada granulometricamente com material granular e resíduos de pavimentos. **In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)**, Maceió, Alagoas. 2018.

QUOOS, João Henrique. **Gerador de Triângulo Textural**. 2011. Disponível em: < <http://www.quoos.com.br/index.php/geografia/solos/4-triangulo-textural-solos-argila-areia-silte>> Acesso em julho de 2022.

RIBEIRO, K. D. ; SOUZA, L. K.. Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. **Revista brasileira de engenharia de Biosistemas**. v. 12, n 2, p. 185-196, 2018.

ROESSLER, Guilherme Andreatta et al. Umidade ótima do solo para fins de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 1, p. 118-127, 2022.

RUSSO, Mário Augusto Tavares. **Tratamento de resíduos sólidos**. Universidade de Coimbra, 2003. p. 196

SANTOS, Thaís Aquino dos. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul**. 2016. Dissertação (mestrado)- Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

TAVARES, António Manuel Barata. **A gestão dos resíduos hospitalares e o papel da autoridade de saúde: caso do concelho da Amadora**. 2004. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/3317>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

TEDESCO, Marino José et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Ufrgs, 1995.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7).

ZANTA, Viviana Maria; FERREIRA, Cynthia Fantoni Alves. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. **AB, de Castilho Júnior (coordenador), Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. São Carlos, SP: Rima Artes e Textos, 2003.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo analisado e estudado na presente pesquisa possui uma alta plasticidade, sua granulometria é de predominância fina, sendo classificado como argiloso de alta compressibilidade pelos sistemas SUCS e TRB. Verificou-se também que após a adição de cinza de resíduos hospitalares a mesma modificou a granulometria e características do solo natural, alterando suas propriedades granulométricas, e minerais como pH, Zn, Ca, Cu.

Ao verificar os resultados e valores obtidos nas análises químicas das misturas e cinza verificou-se que não há presença significativa de contaminantes que possam vir a causar contaminação do lençol freático. Valores como Al são nulos tanto para o solo natural quanto para as misturas de solo/cinza, e demais minerais possuem em sua totalidade valores abaixo de possíveis contaminações.

A substituição parcial de cinzas no solo não alterou expressivamente os valores de limite de liquidez e plasticidade das misturas, quando comparadas aos valores iniciais encontrados no solo natural. Do ponto de vista estatístico os resultados de LL, LP e IP não diferem entre si em nível de 5% de significância. Entretanto após comparar todos os resultados obtidos dos ensaios, pode se concluir que adição de cinza de resíduos hospitalares modificou significativamente a granulometria e características do solo natural.

De acordo com os resultados de compactação, observou-se que os valores de peso específico aparente seco máximo e os teores ótimos de umidade permaneceram similares, independente do teor de adição de cinzas em cada tratamento.

No ensaio de CBR verificou-se que as misturas de solo com adição de 15 e 10% possuem as maiores expansões, e o solo natural e SN+20% de cinza possuem as menores expansões. Entretanto todos os tratamentos possuem expansão menor que o mínimo exigido em norma para utilização em camadas de pavimentos. Os valores de ISC aumentaram significativamente de acordo com a maior percentual de adição de cinza, sendo que o tratamento de SN+20% pode ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos e com expansão inferior <1%. Este resultado pode ser validado também por meio da confirmação estatística, que apresenta o tratamento SN+20% como tratamento mais eficiente.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, pode-se confirmar que o solo natural presente na região de Frederico Westphalen/RS, pode ser aplicado diretamente na camada de sub-base de pavimentos flexíveis, devido a melhoria de suas propriedades após o processo de estabilização. De acordo com norma os valores de ISC a serem alcançados devem ser superiores à 80% para aplicação na camada de base e 20% para a camada de sub-base.

Analisando os resultados de expansão, realizado na energia Proctor Normal, a expansão de todas as misturas e solo natural foram baixas. Para o emprego na camada de base e sub-base, a expansão máxima deve ser de 0,5% e 1%, respectivamente, logo todos os valores de expansão são inferiores ao mínimo exigido para aplicação na camada de sub-base. Deste modo conclui-se que os valores de ISC e Expansão de todos os tratamentos se enquadram de acordo com DNIT (2006) para aplicação na camada de subleito e reforço ao subleito. Ressalta-se ainda que a expansão dos tratamentos e peso específico aparente seco máximo não possui diferenças significativas do ponto de vista estatístico.

Conclui-se que o solo em análise após o processo de estabilização com terroses de substituição por cinza acima de 10% apresentou melhorias significativas, de modo a alcançar os valores e requisitos exigidos em norma pra utilização em camada de pavimento flexível. De acordo com estudos realizados solos argilosos como o caso do da presente pesquisa deve ser estabilizado com valores superiores a 8% de cimento ou com cal de acordo com Metcalf (1972).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND-ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10.004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 14p.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **RDC N°222/2018 COMENTADA**. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/servicosdesaude/publicacoes/rdc-222-de-marco-de-2018-comentada.pdf/view>. Acesso em 20 abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **RDC N°33/2003 de 25 de fevereiro de 2003**. Dispões sobre o regulamento técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde.

ALMEIDA, Felipe Maraschine de. **Energias para compactação de solos destinados a estruturas de pavimentos asfálticos**. 2017. 101 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

ALMEIDA, Mario Sérgio de Souza et al. Correção granulométrica de solos para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da Cenibra. **Revista Árvore**, v. 34, p. 1085-1090, 2010.

ALVES, Hebert da Consolação. **Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte – MG para uso em pavimentação**. 112 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

ALVES, Hebert da Consolação; MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Análise laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte–MG para uso em pavimentação. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 20793-20814, 2021.

AYALA, Rosemary Janneth Llanque. **Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola**. 2020. 272 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) -Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

AZEVEDO, André Luis Cairo de. **Estabilização de solos com adição de cal: Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Geotecnia de pavimentos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – Mg, 2010.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BATALIONE, Giovane. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert; BRANDÃO, Pedro Henrique de Souza Farias; AGUIAR, Larissa Macedo; ALBUQUERQUE, Franklin Willians Ramos Cavalcanti. Estudo de Estabilização de Solos Sedimentares Costeiros com Baixa Capacidade de Suporte. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA: o futuro sustentável do Brasil passa por Minas. 2016, Belo Horizonte- Mg. **Anais [...]**. Belo Horizonte- Mg: COBRAMSEG, 2016. p. 7.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert; SCHMITT, Leonardo Andres; VASCONCELOS, Silvana Machado de; RABASSA, Camila Mendonça; SOUZA, Ezequiel Wustrow. Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. **Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)**, Rio Grande, v. 12, p. 59-67, 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. ABEDA: Rio de Janeiro, 2008.

BORBA, Willian Fernando de. **Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea em área ocupada por aterro sanitário em Seberi–RS**. 2016. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BORBA, Willian Fernando. **Avaliação da contaminação ambiental em um aterro sanitário de pequeno porte, sem utilização de geomembrana, na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

BRASIL, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 2006. 274 p. Rio de Janeiro – RJ, 2006. 3º edição.

BRASIL. **Lei nº 6.938, 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 139 Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 ago. 1981.

BRASIL. **Lei nº 12305, 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. 139 Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 ago. 1981.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 264, de 26 de agosto de 1999.** Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos. DOU nº54, 20 de março de 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 313, 29 de outubro de 2002.** Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. DOU de 22 de novembro de 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 316, 29 de outubro de 2002.** Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. DOU nº 224, de 20 de novembro de 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 358, 29 de abril de 2005.** Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. DOU nº 84, de 4 de Maio de 2005.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.** Edição 06. Ano 02, Vol. 01. Pp 425-438, setembro de 2017.

BRITO, Lélío Antônio Teixeira; GRAEFF, Ângela Gaio. **Métodos de Dimensionamento de Pavimentos–Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações.** Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre–CONCEP, 2009.

CARDOSO, Juliana Gabrielle Florêncio Gomes; ALMEIDA, Guilherme Bravo de Oliveira; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Análise de Estabilização Química de Solo Argiloso com Cimento pra Uso na Pavimentação.** 2016.

CASTRO, Neusa Regina P. Simões de et al. Resíduos de serviços de saúde gerados em unidades de saúde de pequeno porte no município de Jaú-SP: geração e disposição final. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 157-166, 2007.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE -CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** 2017. Confederação Nacional do Transporte.

COSTA, Wesley Moreira da; FONSECA, Maria Christina Grimaldi da. A importância do gerenciamento dos resíduos hospitalares e seus aspectos positivos para o meio ambiente. **Lygia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. 5, n. 9, 2009.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães – Pt, 2001.

CUNHA, Sue Helen Oliveira da; SILVA, Caroline Alvares. Redução de resíduos orgânicos de alimentação coletiva, a partir da otimização do consumo e conservação de alimentos. **REVISTA CONGREGA-MOSTRA DE TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO-** ISSN 2595-3605, n. 1, p. 733-749, 2017.

DIAS, Sylmara Gonçalves. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos. **GV EXECUTIVO**, v. 11, n. 1, p. 16-20, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. 356p.

ELIAS, Deyvid de Souza; SOARES, Anderson Borghetti; SOUZA, Henrique Petisco de. Aproveitamento De Resíduos Sólidos–Estudo Experimental De Misturas De Solo E Cinza Volante De Carvão Mineral. *In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL. Anais [...]*. Criciúma, Santa Catarina. 2017.

FARIAS, Edney Rodrigues de et al. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação: análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FERNANDES, Rodrigo Pascarelli Rebouças; ANDRADE Nogueira de, Melissa; JIMENEZ, Italo Jorge Tavares. ESTUDO DE CASO NO ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MANAUS/AM. *BIUS-Boletim Informativo Unimotrisaúde em Sociogerontologia*, v. 23, n. 17, p. 1-12, 2020.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: Estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – Mg, 2003. Cap. 2.

FREITAS, Jogério Evangelista de. **Uso de cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário**. 2018. XV, 114 f. Dissertação (Mestrado em geotecnia) Universidade de Brasília, Brasília ,2018.

GODECKE, Marcos Vinicius; NAIME, Roberto Harb; FIGUEIREDO, João Alcione Sganderla. O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1700–1712, 2012.

GREGÓRIO, Jaqueline. **Estabilização de um solo da formação palermo com aditivo pz solution**. 2010. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma – Sc, 2010.

GÜNTHER, Wanda Maria Risso. **Resíduos sólidos no contexto da saúde ambiental**. Tese (Doutorado em Avaliação, Prevenção e Controle da Poluição por Resíduos Sólidos) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. Manual internacional de fertilidade do solo/tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2ed. rev. e ampl. Piracicaba. **Potafos**. 1998. 177P.

MALANCONI, Maurício. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano**. 2013. Dissertação (Mestrado)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. 2013.

MACHADO, Nélia Lima; MORAES, Luiz Roberto Santos. RSSS: revisitando as soluções adotadas no Brasil para tratamento e destino final. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 55-64, 2004.

MEHLICH, Adolph. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 9, n. 6, p. 477-492, 1978.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo JM; CARMONA FILHO, Antônio. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. **Pini**, 1994.

MENDES, Rodolfo Moreda. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

METCALF, Evan Bowen. **ECONOMIC STABILIZATION BY AMERICAN BUSINESS IN THE TWENTIETH-CENTURY**. The University of Wisconsin-Madison, 1972.

MONTEIRO, José Henrique Penido et al. Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos. 2001. **Rio de Janeiro: IBAM**, 2001.

MORGADO, Túlio C.; FERREIRA, Osmar Mendes. Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Co-geração de Energia. Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia. **Revista da Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO**, v. 2, n. 1-18, 2006.

NEVES, Célia et al. Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra-prácticas de campo. **Lisboa: Rede Ibero-Americana Proterra**, 2009.

NUNES, Beatriz Mesquita; SILVA, Naiara Maria Rufino da; OLIVEIRA, Flávio de Sousa. Avaliação do manejo e descarte de resíduos hospitalares em Teresina, PI. VII CONNEPI- Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. **Anais [...]**. Palmas, Tocantins, 2012.

NÚÑEZ, Washington Peres. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. 150f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Rs, 1991.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PASSOS, Bruno Conde et al. Análise do CBR de sub-base argilosa estabilizada granulometricamente com material granular e resíduos de pavimentos. **In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)**, Maceió, Alagoas. 2018.

PEREIRA, Eduardo Vinícius. **Resíduos sólidos**. Editora Senac São Paulo, 2019.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araujo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012, 125f. Dissertação (Mestrado). Curso de Mecânica das Estruturas, Estruturas de Concreto e Alvenaria e Materiais e Processos Construtivos. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PESSOA, Francisco Hélio Caiatano. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. 2004. Dissertação (Mestrado)- Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2004

QUOOS, João Henrique. **Gerador de Triângulo Textural**. 2011. Disponível em: < <http://www.quoos.com.br/index.php/geografia/solos/4-triangulo-textural-solos-argila-areia-silte> > Acesso em julho de 2022.

ReCESA. **Esgotamento sanitário: operação e manutenção de sistemas simplificados de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento: nível 2**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte: ReCESA, 2008. 112 p.
Ribeiro, K. D., & Souza, L. K. (2018). CORRELATION BETWEEN GRANULOMETRY AND ORGANIC SOIL MATTERS WITH LIMITS OF ATTERBERG. **Revista Brasileira De Engenharia De Biosistemas**, 12(2), 185–196. 2018.

RIBEIRO, K. D. ; SOUZA, L. K.. Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. **Revista brasileira de engenharia de Biosistemas**. v. 12, n 2, p. 185-196, 2018.

ROESSLER, Guilherme Andreatta et al. Umidade ótima do solo para fins de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 1, p. 118-127, 2022.

RUSSO, Mário Augusto Tavares. **Tratamento de resíduos sólidos**. Universidade de Coimbra, 2003. p. 196

RUTALA, William A.; SARUBBI, Felix A. Management of infectious waste from hospitals. **Infection Control & Hospital Epidemiology**, v. 4, n. 4, p. 198–204, 1983.

SANTOS, Jaqueline Guimarães. A Logística Reversa Como Ferramenta Para a Sustentabilidade: um estudo sobre a importância das cooperativas de reciclagem na gestão dos resíduos sólidos urbanos. **Revista Reuna**, v. 17, n. 2, p. 81–96, 17 out. 2012.

SANTOS, João Eduardo Correia dos. **Gestão de resíduos hospitalares em Portugal e avaliação de impactes no ambiente e na saúde**. Tese de Doutorado. [s.n.], 2013.

SANTOS, Thaís Aquino dos. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul.** 2016. Dissertação (mestrado)- Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão.** Campo Mourão: UTFPR, 2015.

SILVA, Vivian Mendes da. **Testes de resistência em misturas solo/cinza pesada visando a aplicabilidade em pavimentação.** Salão de iniciação Científica (17.: 2005: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2005., 2005.

SOLOS, Sistema Brasileiro de Classificação/ Humberto Gonçalves dos Santos... [et al.]. 5. Ed., rev. Ampl. – Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. 356p.

SOUZA, Alan Nunes de Siqueira. **Estudo de mistura solo-cal para base de pavimento rodoviário.** 2014. 71p. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Civil, UniCEUB, Brasília - Df, 2014.

SCHROEDER, Élcio Mário; CASTRO, José Carlos de. **Transporte rodoviário de carga no Brasil: situação atual e perspectivas.** 1996.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação.** 2000. 151f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Rs, 2000.

SPECHT, Luciano Pivoto et al. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. **42ª Reunião Anual de Pavimentação.** Rio de Janeiro: ABPv, 2013.

TAVARES, António Manuel Barata. **A gestão dos resíduos hospitalares e o papel da autoridade de saúde: caso do concelho da Amadora.** 2004. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/3317>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

TEDESCO, Marino José et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

VILLIBOR, Douglas Fadul et al. Pavimentos de baixo custo para vias urbanas. **São Paulo: Arte & Ciência**, 2009.

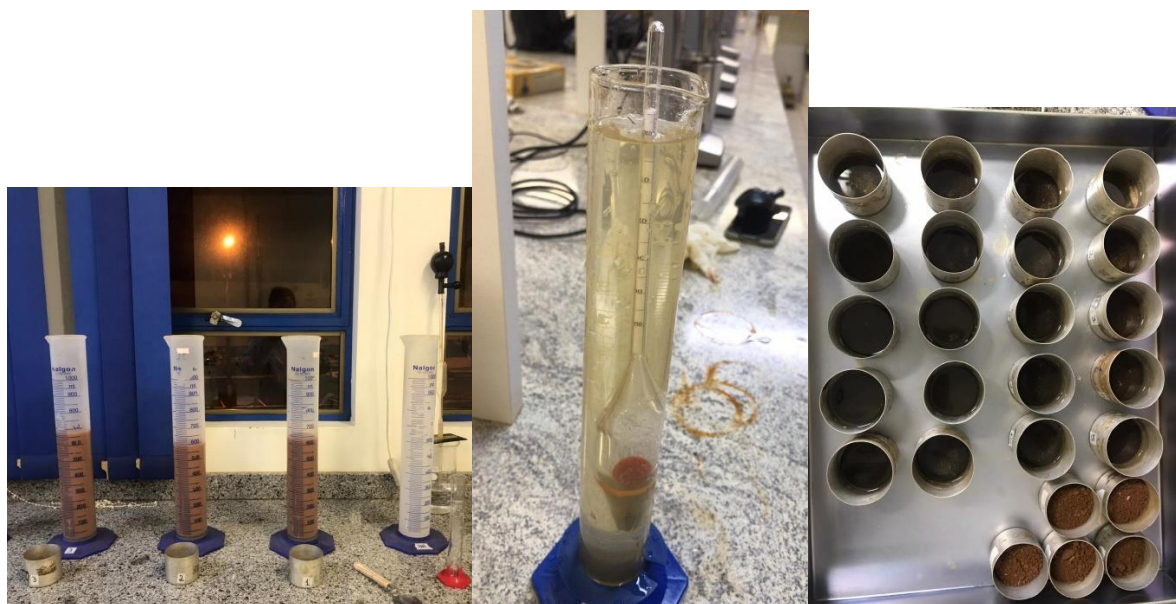
VIZCARRA, Gino Omar Calderón. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos.** Monografia do Curso de Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)

ZANTA, Viviana Maria; FERREIRA, Cynthia Fantoni Alves. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. **AB, de Castilho Júnior (coordenador), Resíduos sólidos**

urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. São Carlos, SP: Rima Artes e Textos, 2003.

APÊNDICE A- FOTOGRAFIAS RETIRADAS DURANTE A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS













**APÊNDICE B- ANÁLISE QUÍMICA DAS CINZAS DE RESÍDUOS
HOSPITALARES FORNECIDAS PELA EMPRESA AMBIENTUUS**

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

LAUDO DE ANÁLISE

LAUDO NÚMERO : 32108 / 98

PÁGINA : 1

Procedência : AMBIENTUUS-TRAT EXP FINAL E TRANSPORTE DE RESÍDUOS
Endereço : R VINTE E CINCO DE JULHO, 471
Cidade : PORTO ALEGRE - RS

AMOSTRA

Tipo : Resíduo
Identificação : Cinzas
Recebimento : 25/11/98

COLETA

Responsável : Laborquímica
Data : 25/11/98

Cond. Climáticas : Tempo Bom
Conservação : Sim

RESULTADO DA ANÁLISE

| Parâmetro | Unidade | Resultado | Metodologia | LD | IM |
|-------------------|----------|-----------|--------------------------------|-------|------|
| Umidade | % H2O | 1,1 | Gravimetria | 0,005 | 10,0 |
| pH (Solução a 5%) | -X-X-X- | 11,8 | Potenciometria Direta | 0,01 | 4 |
| Óleos e Graxas | mg/l | N.D. | Gravimetria-Partição | 1,0 | 7,0 |
| Cianetos | mg/l CN- | N.D. | Complexometria | 0,1 | 4,0 |
| Sulfetos | ppm H2S | N.D. | Espec. Abs. Mol.-Azul Metileno | 0,01 | 10,0 |
| Cinzas | % | 98,8 | Gravimetria | 0,005 | 6,5 |

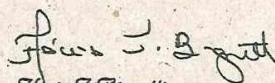
LEGENDA

ND = Não Detectado; LD = Limite de Detecção ; IM = Incerteza do Método (%); Prejud = Prejudicado

OBSERVAÇÕES

Resultados expressos em base seca, com exceção de pH e umidade.

Porto Alegre, 08/01/99


Flávia J. Bignetti
Químico - CRQ - V 05200128

O resultado deste laudo tem significação restrita e se aplica tão somente à amostra analisada.

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

LAUDO DE ANÁLISE

LAUDO NÚMERO : 32110 / 98

PÁGINA : 1

Procedência : AMBIENTUUS-TRAT EXP FINAL E TRANSPORTE DE RESÍDUOS
Endereço : R VINTE E CINCO DE JULHO, 471
Cidade : PORTO ALEGRE - RS

AMOSTRA
Tipo : Extrato de Solubilização
Identificação : Cinzas
Recebimento : 25/11/98

COLETA
Responsável : Laborquímica
Data : 25/11/98

Cond. Climáticas : Tempo Bom
Conservação : Sim

RESULTADO DA ANÁLISE

| Parâmetro | Unidade | Resultado | Metodologia | LD | IM |
|--------------|---------------|-----------|--------------------------------|-------|------|
| Fenóis | mg/l C6H5OH | 0,14 | Espec. Abs. Mol. UV-V CHCl3 | 0,005 | 12,0 |
| Surfactantes | mg/l ABS | 0,06 | Espec. Abs. Mol.-Azul Metileno | 0,01 | 10,0 |
| Cianetos | mg/l CN- | N.D. | Complexometria | 0,1 | 4,0 |
| Cloretos | 2500 mg/l Cl- | 3412,0 | Titul. Precipit.-Argentimetria | 0,2 | 1,7 |
| Fluoretos | 1,5 mg/l F- | 2,6 | Espectrof. Abs. Molecular-UV-V | 0,01 | 2,4 |
| Sulfatos | mg/l SO4- | 3949,0 | Turbidimetria | 1,0 | 3,0 |
| Nitratos | mg/l NO3- | N.D. | Espec. Abs. Mol. Ác. Dissulf. | 0,01 | 5,0 |
| Dureza | mg/l CaCO3 | 78,0 | Complexometria | 0,5 | 0,8 |
| Alumínio | 0,2 mg/l Al | 1560,0 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,1 | 8,4 |
| Arsênio | 0,05 mg/l As | 3,34 | Espec. Abs. Atom.-Ger. Hidreto | 0,002 | 10,0 |
| Bário | mg/l Ba | 0,08 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,03 | 2,7 |
| Chumbo | 0,05 mg/l Pb | 0,65 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,05 | 0,2 |
| Cobre | mg/l Cu | 0,28 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,01 | 2,8 |
| Cromo Total | 1,0 mg/l Cr | 6,7 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,02 | 3,7 |
| Cádmio | 0,005 mg/l Cd | 0,07 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,01 | 5,1 |
| Ferro Total | mg/l Fe | 0,29 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,02 | 2,3 |
| Manganês | mg/l Mn | 0,04 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,01 | 6,0 |
| Mercúrio | mg/l Hg | N.D. | Espec. Abs. Atom.-Vapor Frio | 0,001 | 8,4 |
| Prata | 0,05 mg/l Ag | 0,14 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,02 | 3,5 |
| Selênio | mg/l Se | 0,009 | Espec. Abs. Atom.-Ger. Hidreto | 0,002 | 10,0 |
| Sódio | 2000 mg/l Na | 11050,0 | Espectrof. de Emissão Atômica | 0,01 | 4,0 |
| Zinco | mg/l Zn | 1,73 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,02 | 0,4 |

LEGENDA

Certificado de Cadastro na FEPAM nº 0029/97 - DL
Responsável Técnico: Engº Químico José Carlos Bignetti - CRQ 05300675
Rua Buarque de Macedo, 18 e 20 - Fone:(051) 222.7555 - Fax: (051) 222.2993 - CEP 90230-250 - Porto Alegre - RS

Segue ..

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

LAUDO DE ANÁLISE

LAUDO NÚMERO : 32109 / 98

PÁGINA : 1

Procedência : AMBIENTUUS-TRAT EXP FINAL E TRANSPORTE DE RESÍDUOS
Endereço : R VINTE E CINCO DE JULHO, 471
Cidade : PORTO ALEGRE - RS

AMOSTRA
Tipo : Extrato de Lixiviação
Identificação : Cinzas
Recebimento : 25/11/98

COLETA
Responsável : Laborquímica
Data : 25/11/98

Cond. Climáticas : Tempo Bom
Conservação : Sim

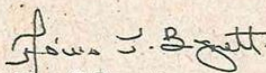
RESULTADO DA ANÁLISE

| Parâmetro | Unidade | Resultado | Metodologia | LD | IM |
|-------------|---------|-----------|--------------------------------|-------|------|
| Fluoretos | mg/l F- | 1,0 | Espectrof. Abs. Molecular-UV-V | 0,01 | 2,4 |
| Arsênio | mg/l As | 0,034 | Espec. Abs. Atom.-Ger. Hidreto | 0,002 | 10,0 |
| Bário | mg/l Ba | 1,0 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,03 | 2,7 |
| Chumbo | mg/l Pb | 0,12 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,05 | 0,2 |
| Cromo Total | mg/l Cr | 4,55 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,02 | 3,7 |
| Cádmio | mg/l Cd | 0,02 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,01 | 5,1 |
| Mercúrio | mg/l Hg | 0,002 | Espec. Abs. Atom.-Vapor Frio | 0,001 | 8,4 |
| Prata | mg/l Ag | 0,03 | Espectrof. de Absorção Atômica | 0,02 | 3,5 |
| Selênio | mg/l Se | 0,002 | Espec. Abs. Atom.-Ger. Hidreto | 0,002 | 10,0 |

LEGENDA

ND = Não Detectado; LD = Limite de Detecção ; IM = Incerteza do Método (%); Prejud = Prejudicado

Porto Alegre, 08/01/99


Flávia T. Bignetti
Químico - CRQ - V 05200128

O resultado deste laudo tem significação restrita e se aplica tão somente à amostra analisada.

Certificado de Cadastro na FEPAM nº 0029/97 - DL
Responsável Técnico: Engº Químico José Carlos Bignetti - CRQ 05300675
Rua Buarque de Macedo, 18 e 20 - Fone:(051) 222.7555 - Fax: (051) 222.2993 - CEP 90230-250 - Porto Alegre - RS

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

| Determinação | Unidades | Resultado |
|-------------------|----------------------|-----------|
| Umidade | % H ₂ O | 1,1 |
| pH (solução a 5%) | -x-x-x- | 11,8 |
| Óleos e Graxas | % | N.D. |
| Cianetos | ppm CN ⁻ | N.D. |
| Sulfetos | ppm H ₂ S | N.D. |
| Cinzas | % | 98,8 |

Os resultados estão expressos em base seca, com exceção da umidade.

5- Ensaio de Lixiviação:

Foram observados todos os procedimentos estabelecidos na NBR-10.005. Não foram constatadas anormalidades durante sua execução.

Foram obtidos os seguintes dados ao longo do ensaio:

pH inicial: 12,01
pH após 24 horas: 9,57
Tempo total da lixiviação: 24 horas
Volume de ácido: 400 ml
Volume de líquido obtido: 1.470,0 ml

Os resultados obtidos no líquido lixiviado poderão ser observados no laudo de análise n° 32109/98.

Na tabela a seguir, apresentamos uma comparação entre os resultados obtidos e os limites máximos admissíveis neste ensaio, segundo NBR-10.004, para que o resíduo seja classificado como *Resíduo Classe II - Não Perigoso*.

| Determinação | Unidades | Resultado | Máximo segundo NBR-10.004 |
|--------------|---------------------|-----------|---------------------------|
| Fluoretos | mg/l F ⁻ | 1,0 | 150,0 |
| Arsênio | mg/l As | 0,034 | 5,0 |
| Bário | mg/l Ba | 1,00 | 100,0 |
| Chumbo | mg/l Pb | 0,12 | 5,0 |
| Cromo | mg/l Cr | 4,55 | 5,0 |
| Cádmio | mg/l Cd | 0,02 | 0,5 |

Segue...

2

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

| Determinação | Unidades | Resultado | Máximo segundo NBR-10.004 |
|--------------|----------|-----------|---------------------------|
| Mercúrio | mg/l Hg | 0,002 | 0,1 |
| Prata | mg/l Ag | 0,03 | 5,0 |
| Selênio | mg/l Se | 0,002 | 1,0 |

N.D. = Não detectado.

6- Ensaio de Solubilização:

O ensaio transcorreu com normalidade.

Os resultados obtidos na análise do extrato do ensaio, que aparecem no Laudo 32110/98, estão transcritos a seguir e comparados com os valores máximos estabelecidos.

Apresentamos em negritos resultados que se encontram acima destes limites.

| Determinação | Unidades | Resultado | Máximo segundo NBR-10.004 |
|--------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------|
| Fenóis | mg/l C ₆ H ₅ OH | 0,14 | 0,001 |
| Surfactantes | mg/l A.B.S. | 0,06 | 0,2 |
| Cianetos | mg/l CN ⁻ | N.D. | 0,1 |
| Cloretos | mg/l Cl ⁻ | 3.412,0 | 250,0 |
| Fluoretos | mg/l F ⁻ | 2,6 | 1,5 |
| Sulfatos | mg/l SO ₄ ⁻ | 3.949,0 | 400,0 |
| Nitratos | mg/l NO ₃ ⁻ | N.D. | 44,3 |
| Dureza | mg/l CaCO ₃ | 78,0 | 500,0 |
| Alumínio | mg/l Al | 1.560,0 | 0,2 |
| Arsênio | mg/l As | 3,34 | 0,05 |
| Bário | mg/l Ba | 0,08 | 1,0 |
| Chumbo | mg/l Pb | 0,65 | 0,05 |
| Cobre | mg/l Cu | 0,28 | 1,0 |
| Cromo | mg/l Cr | 6,7 | 0,05 |

Segue...

3

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

| Determinação | Unidades | Resultado | Máximo segundo NBR-10.004 |
|--------------|----------|-----------|---------------------------|
| Cádmio | mg/l Cd | 0,07 | 0,005 |
| Ferro | mg/l Fe | 0,29 | 0,3 |
| Manganês | mg/l Mn | 0,04 | 0,1 |
| Mercúrio | mg/l Hg | N.D. | 0,001 |
| Prata | mg/l Ag | 0,14 | 0,05 |
| Selênio | mg/l Se | 0,009 | 0,01 |
| Sódio | mg/l Na | 11.050,0 | 200,0 |
| Zinco | mg/l Zn | 1,73 | 5,0 |

N.D. = Não detectado

7- Inflamabilidade:

A amostra não foi capaz de produzir fogo por fricção, por absorção de umidade e muito menos por reação espontânea.

8- Corrosividade:

O resíduo não possui características corrosivas. Sua solução a 5% apresentou característica alcalina, mas seu pH ficou abaixo do mínimo para ser classificada como corrosiva.

9- Reatividade:

O resíduo apresentou-se estável, não reagindo de forma violenta, nem formando misturas explosivas com a água. Não gerou gases em contato com a água. O material analisado não se mostrou explosivo.

10- Toxicidade:

O extrato obtido no ensaio de Lixiviação não apresentou nenhum dos parâmetros analisados com concentração acima do máximo permitido. Não foi realizado ensaio específico de toxicidade em organismos vivos.

LABORQUÍMICA

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS LTDA.

11- Patogenicidade:

Não foi avaliada a possibilidade do resíduo conter microorganismos patogênicos ou suas toxinas.

12- Classificação do resíduo:

Analisando primeiramente os resultados obtidos no ensaio de Lixiviação, podemos dizer que se trata de um resíduo que não apresenta nenhuma das propriedades para classificá-lo, por este critério, como perigoso. Porém salientamos a importância de um controle rigoroso em relação a concentração de Cromo, que encontra-se bem próximo do valor máximo permitido.

No ensaio de Solubilização são encontrados valores elevados para Fenóis, Cloretos, Fluoretos, Sulfatos, Alumínio, Arsênio, Chumbo, Cromo, Cádmio, Prata, e Sódio, fato que torna inviável uma classificação como resíduo inerte.

Finalmente, e tendo em vista o acima exposto, encontramos como classificação mais correta para o resíduo: **RESÍDUO CLASSE II - NÃO INERTE.**

Salientamos que tal classificação foi baseada nos dados e informações disponíveis e nos resultados das análises realizadas com base na amostra recebida.

Dependendo do destino a ser dado ao material, poderão ser realizados outros testes e ensaios, com vistas a complementar sua composição ou buscar informações que venham a ser pertinentes.

13- Anexos:

Em anexo encontram-se os laudos de análise dos extratos dos ensaios de Lixiviação e Solubilização e da Composição da amostra e uma cópia do questionário com informações sobre o resíduo.

Porto Alegre, 08 de janeiro de 1999.

Flávia T. Bignetti
Químico - CRQ - V 05200128

APÊNDICE C- ANÁLISES ESTATÍSTICAS E COMPARAÇÕES DE MÉDIAS

Tabela- Valores médios da fração areia, silte e argila de um Latossolo Vermelho sem adição de cinza e com adição de cinzas de resíduos hospitalares

| IDENTIFICAÇÃO | AREIA | SILTE % | ARGILA |
|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| SN | 5,64 ^a | 51,78 ^a | 42,59 ^a |
| SN+10% | 11,08 ^b | 88,92 ^b | 0 ^b |
| SN+15% | 12,83 ^c | 87,17 ^b | 0 ^b |
| SN+20% | 16,33 ^d | 83,67 ^c | 0 ^b |
| GL Tratamento | 3 | 3 | 3 |
| GL Erro | 16 | 16 | 16 |
| QM Tratamento | 99,46 | 1540 | 2270 |
| QM Erro | 0,47 | 1,28 | 0,90 |
| CV | Precisão alta CV < 10% | Precisão alta CV < 10% | Precisão alta CV < 10% |

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

Tabela- Valores médios de limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade do solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares

| Identificação | LL (%) | LP (%) | IP |
|---------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| SN média | 52,20 ^a | 38,70 ^a | 13,62 ^a |
| SN+10% média | 51,04 ^a | 38,93 ^a | 12,11 ^a |
| SN+15% média | 53 ^a | 37,89 ^a | 15,11 ^a |
| SN+20% média | 49,28 ^a | 38,91 ^a | 13,45 ^a |
| GL Tratamento | 3 | 3 | 3 |
| GL Erro | 16 | 16 | 16 |
| QM Tratamento | 19,35 | 3,30 | 13,43 |
| QM Erro | 19,28 | 1,17 | 4,09 |
| CV | Precisão baixa CV > 20% | Precisão muito baixa CV 30% | Precisão média CV < 20% |

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

Tabela - Valores médios das propriedades químicas do solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares.

| PROPRIEDADES | | AMOSTRA | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---------|------|--------|------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | GL | | QM | | SN | S10 | S15 | S20 |
| | | Trat. | Erro | Trat. | Erro | | | | |
| pH água | | 3 | 3 | 3,98 | 0,06 | 6,54 ^a | 7,96 ^b | 7,98 ^{bc} | 8,29 ^c |
| M. O. | % | 3 | 16 | 0,02 | 0,01 | 1,39 ^a | 1,44 ^a | 1,31 ^a | 1,32 ^a |
| CTC pH 7,0 | | 3 | 16 | 218,04 | 0,64 | 7,23 ^a | 18,30 ^b | 20,80 ^c | 21,40 ^c |
| SMP | | | | | | 6,70 | 7,90 | 8 | 8,35 |
| P | | | | | | 4,24 | 22,45 | 23,40 | 21,60 |
| K | | | | | | 66,96 | 700,80 | 806,40 | 782,40 |
| Cu | | | | | | 10,20 | 4,52 | 3,70 | 3,56 |
| Zn | mg/dm ³ | | | | | 6,68 | 81,43 | 81,40 | 69,51 |
| Ca | | | | | | 3,68 | 15,19 | 17,60 | 18,51 |
| Mg | | | | | | 1,42 | 0,83 | 0,70 | 0,59 |
| Al | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Al+H | | | | | | 1,95 | 0,49 | 0,44 | 0,29 |
| CTC Efetiva | cmolc/dm ³ | | | | | 5,28 | 17,81 | 20,36 | 21,10 |
| CV propriedades | | | | | | Precisão Alta CV < 10% | | | |

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).

Tabela- Valores médios de expansão, massa específica aparente seca e Índice de Suporte Califórnia para os tratamentos de solo natural e solo substituído parcialmente por cinza de resíduos hospitalares

| Identificação | Massa específica aparente seca (KG/M3) | Umidade ótima (%) | ISC (%) | Expansão (%) |
|---------------|--|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| SN | 1435,90 ^a | 35,70 ^a | 9,98 ^a | 0,24 ^a |
| SN+10% | 1370,85 ^a | 32,20 ^a | 13,75 ^{ab} | 0,75 ^a |
| SN+15% | 1363,17 ^a | 36,20 ^a | 13 ^{ab} | 0,89 ^a |
| SN+20% | 1346,55 ^a | 34,80 ^a | 20,37 ^c | 0,71 ^a |
| GL Tratamento | 3 | 3 | 3 | 3 |
| GL Erro | 16 | 12 | 12 | 12 |
| QM Tratamento | 8090 | 245,15 | 77,40 | 0,28 |
| QM Erro | 2860 | 2,87 | 4,57 | 04 |
| CV | Precisão Alta CV < 10% | Precisão Alta CV < 10% | Precisão Alta CV < 10% | Precisão Baixa CV > 20% |

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, em nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2022).